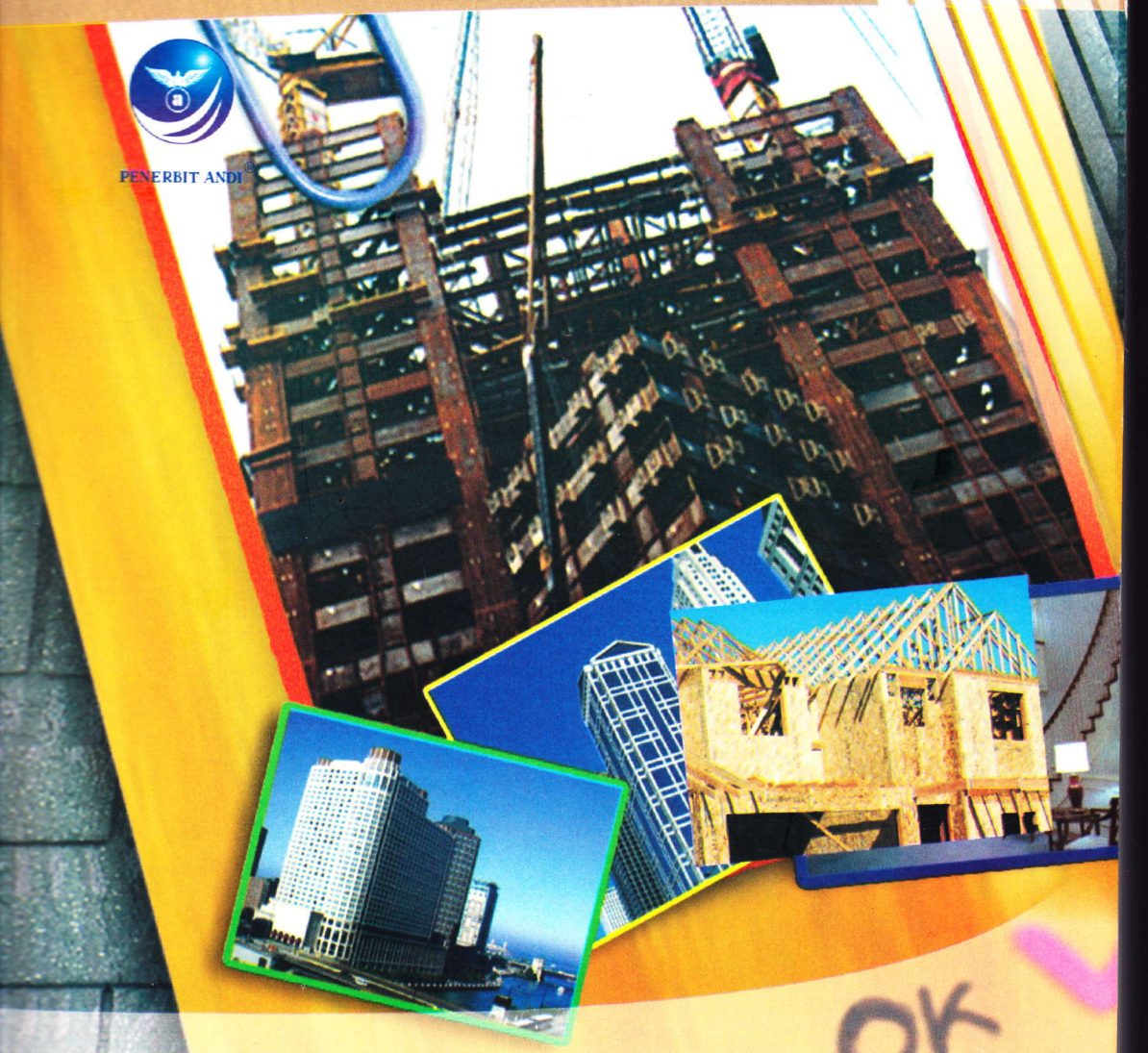


PENERBIT ANDI

KAAN
N
IMUR

FISIKA BANGUNAN

Prasasto Satwiko

FISIKA BANGUNAN

Prasasto Satwiko

Penerbit ANDI Yogyakarta

MILIK
Badan Perpustakaan
dan Kearsipan
Propinsi Jawa Timur
345.900/BPK/P/2010

Fisika Bangunan
Oleh: Prasasto Satwiko

Hak Cipta © 2009 pada Penulis

Editor : Fl. Sigit Suyantoro
Setting : Sri Mulanto
Desain Cover : Dany
Korektor : Suci Nurasih / Aktor Sadewa

Hak Cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

Penerbit: C.V ANDI OFFSET (Penerbit ANDI)
Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax. (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Percetakan: ANDI OFFSET
Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax. (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Perpustakaan Nasional: Katalog dalam Terbitan (KDT)

Satwiko, Prasasto
Fisika Bangunan / Prasasto Satwiko;
– **Ed. 1**. – Yogyakarta: ANDI,
18 17 16 15 14 13 12 11 10 09
xii + 372 hlm .; 16 x 23 Cm.
10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
ISBN: 978 – 979 – 29 – 0734 – 6
I. Judul
1. Applied Physics
DDC'21 : 530

Prakata

Dunia desain arsitektur berkembang sangat cepat. Bangunan dengan desain baru yang berasal dari gagasan segar muncul di mana-mana. Teknologi digital telah menawarkan percepatan kemajuan dunia arsitektur melalui penyebaran gagasan-gagasan baru dan cara penyelesaian desain secara cepat, akurat, mudah dan menyenangkan dengan tersedianya berbagai program grafis dan simulasi. Namun demikian, di sisi lain, ternyata kehadiran aneka program komputer canggih tersebut tidak serta merta mempermudah para arsitek memahami aspek fisikawi bangunan. Akibatnya, banyak bangunan yang secara estetis menawan namun dari segi fisikawinya tidak dapat dipertanggung-jawabkan.

Buku *Fisika Bangunan* ini merupakan hasil penggabungan dari buku *Fisika Bangunan 1* dan *Fisika Bangunan 2*. Sesuai masukan dari para kritisi, buku *Fisika Bangunan* ini tetap menghindari perhitungan-perhitungan rumit yang memerlukan pemahaman matematika lanjut. Buku ini masih dilandasi semangat membantu para pembaca (mahasiswa arsitektur, arsitek pengajar, arsitek praktisi, siswa sekolah menengah kejuruan dan para pemerhati bangunan) untuk memahami prinsip-prinsip fisika bangunan dengan cara yang sederhana dan sistematis. Diharapkan buku ini dapat menjadi pemicu sidang pembaca untuk menggali informasi lebih mendalam, utamanya lewat internet, yang informasinya berlimpah, gratis, dan selalu *up to date*.

Semoga buku ini dapat memberi sumbangan positif bagi dunia arsitektur di Indonesia.

Prasasto Satwiko
2008
psatwiko@yahoo.com

Daftar Isi

PRAKATA ..... **iii**

DAFTAR ISI ..... **v**

BAB 1 VENTILASI ALAMI **1**

1.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Ventilasi **4**

1.2 Memperkirakan Kecepatan dan Arah Angin, Suhu dan Kelembaban **18**

1.2.1 Memperkirakan Kecepatan Angin 18

1.2.2 Memperkirakan Suhu Udara 20

1.2.3 Memperkirakan Kelembaban Udara 20

1.3 Ringkasan Pengetahuan Dasar **21**

1.4 Aspek Perancangan **25**

1.5 Aspek Matematis **33**

1.5.1 Transmitan Elemen Bangunan Berlapis 34

1.5.2 Panas yang Menembus Elemen Bangunan 40

1.5.3 Panas yang Menembus Kaca 41

1.5.4 Kenaikan Suhu Benda oleh Radiasi Matahari .. 41

1.5.5 Kecepatan Angin di Ketinggian Tertentu, m/dtk 42

1.6 Aliran Udara Karena Perbedaan Tekanan Angin, Qp (p = pressure) **43**

1.6.1 Aliran Udara untuk Membuang Panas, Q, Tanpa Memperhatikan Volume Ruang 45

1.6.2 Aliran Udara untuk Membuang Panas, Q, dengan Memperhatikan Volume Ruang 45

1.6.3 Aliran Udara Karena Perbedaan Suhu Udara, QB (B buoyancy, daya apung) 45

1.6.4 Aliran Udara yang Diakibatkan oleh Gabungan Tekanan Angin dan Perbedaan Suhu 46
1.6.5 Indeks Kenyamanan Termal Menurut PMV dan PPD 46
1.6.6 Tabel Mahoney 47
1.6.7 Perbedaan Suhu Kawasan Berbangunan dan Tak Berbangunan 53
1.6.8 Suhu Perkotaan Akibat Populasi 53
1.7 Contoh-contoh Perhitungan 54
1.7.1 Menghitung Transmitan Elemen Bangunan 54
1.7.2 Menghitung Panas yang Menembus Elemen Bangunan 57
1.7.3 Menghitung Panas yang Menembus Kaca 58
1.7.4 Menghitung Suhu Benda Oleh Radiasi Matahari Langsung 58
1.7.5 Menghitung Kecepatan Angin di Ketinggian Tertentu 61
1.7.6 Menghitung Debit Aliran Udara Melalui Jendela Akibat Angin Luar 62
1.7.7 Menghitung Aliran Udara yang Diperlukan untuk Mempertahankan Suhu Ruang 63
1.7.8 Menghitung Aliran Udara yang Diperlukan untuk Mempertahankan Suhu Ruang dengan Memperhitungkan Volume Ruang 64
1.7.9 Menghitung Aliran Udara oleh Perbedaan Suhu 65
1.7.10 Menghitung Kenyamanan Ruangan 65
1.7.11 Mencari Rekomendasi Desain dengan Tabel Mahoney 69
1.8 GALERI 75
1.9 Alamat Penting di Internet 81
1.10 Software 81

BAB 2 VENTILASI BUATAN 87
2.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Ventilasi Buatan 90
2.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar 98
2.3 Aspek Perancangan 104
2.3.1 Pertimbangan Desain Bangunan untuk Menghemat Energi AC 105
2.3.2 Pertimbangan Perilaku Berada di Ruang Ber-AC 107
2.4 Aspek Matematis 109
2.4.1 Menghitung Konduktan Elemen Bangunan 109
2.4.2 Menghitung Kebutuhan Penyejukan dengan Metode Keseimbangan Termal 111
2.4.3 Menghitung OTTV 113
2.5 Contoh Perhitungan 119
2.5.1 Menghitung Konduktan Elemen Bangunan 119
2.5.2 Menghitung Kebutuhan Penyejukan dengan Metode Keseimbangan Termal 120
2.5.3 Menghitung OTTV 130
2.6 Galeri 135
2.7 Alamat Internet 136
2.8 Software 138

BAB 3 PENCAHAYAAN ALAMI 141
3.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Pencahayaan 144
3.2 Memperkirakan Intensitas Cahaya yang Dipancarkan Objek 148
3.3 Ringkasan Pengetahuan Dasar 149
3.4 Aspek Perancangan 155
3.5 Aspek Matematis 157
3.5.1 Iluminasi (dari Sumber Cahaya Titik), E 157

3.5.2 Sinar Matahari Langsung 158
3.5.3 Faktor Cahaya Siang Hari (Daylight Factor), DF 160
3.6 Contoh-contoh Perhitungan 167
3.6.1 Menghitung Iluminan Titik di dalam Ruangan 167
3.6.2 Menggambar Bayangan oleh Sinar Matahari... 168
3.6.3 Menghitung Faktor Cahaya Siang Hari, DF 171
3.7 Galeri 183
3.8 Alamat Internet 186
3.9 Software 187
BAB 4 PENCAHAYAAN BUATAN 189
4.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Pencahayaan Buatan 191
4.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar 200
4.2.1 Sedikit Tentang Sejarah Lampu 200
4.2.2 Karakter Lampu Sesuai dengan Warna Sinarnya 200
4.2.3 Lampu Pijar (Incandescent) 201
4.2.4 Lampu Fluorescent 203
4.2.5 Lampu HID (High-Intensity Discharge) 204
4.2.6 Lampu LED (Light Emmiting Diode) 205
4.3 Aspek Perancangan 206
4.3.1 Teknik Pencahayaan Langsung 207
4.3.2 Teknik Pencahayaan Tak Langsung 209
4.3.3 Teknik Penerangan Aksen 210
4.3.4 Teknik Pembayangan 210
4.3.5 Kualitas Permukaan Ruang 211
4.3.6 Memberi Kesan pada Lingkungan 212
4.3.7 Pencahayaan pada Rumah Tinggal 214
4.3.8 Pencahayaan untuk Kantor 218

4.3.9 Penerangan untuk Rumah Makan 219
4.3.10 Penerangan untuk Nightclub 220
4.4 Aspek Matematis 220
4.4.1 Kontras 220
4.4.2 Luminan (Kecerahan atau Brightness) 220
4.4.3 Metode Titik (Point to Point Method) 221
4.4.4 Metode Lumen (Lumen Method atau Zonal Cavity Method, ZCM) 223
4.4.5 Menghitung Kebutuhan Biaya Lampu 230
4.4.6 Menghitung Panas yang Dikeluarkan oleh Lampu 230
4.5 Contoh Perhitungan 231
4.5.1 Menghitung Kontras 231
4.5.2 Menghitung Luminan Permukaan Tak Transparan 231
4.5.3 Menghitung Luminan Permukaan Transparan. 232
4.5.4 Menghitung Iluminasi di Bidang Kerja oleh Satu Lampu 232
4.5.5 Menghitung Iluminasi di Bidang Kerja oleh Beberapa Lampu 234
4.5.6 Menghitung CCR, RCR dan FCR Ruang Berbentuk Kotak 235
4.5.7 Menghitung CCR, RCR dan FCR Ruang Berbentuk L 236
4.5.8 Menghitung CCR Ruang Berbentuk Segitiga.. 237
4.5.9 Menghitung Bilangan Pantul Rata-rata Permukaan Ruang 238
4.5.10 Menghitung Bilangan Pantul Rongga Langit-langit Efektif Kubah 238
4.5.11 Menghitung Bilangan Rongga Langit-langit Efektif dengan Luminer di Bawah Dasar Kubah 239
4.5.12 Menghitung Kebutuhan Luminer 241

4.6 Galeri **257**
4.7 Alamat Internet **259**
4.8 Software **260**

BAB 5 AKUSTIK ALAMI **263**
5.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Akustika **264**
5.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar **277**
5.3 Aspek Perancangan **281**
5.3.1 Prosedur Perancangan 281
5.3.2 Strategi Umum Penanganan Kebisingan 282
5.3.3 Strategi Penanganan Kebisingan Ruang Luar.. 283
5.3.4 Strategi Penanganan Kebisingan Ruang Dalam 284
5.3.5 Auditorium 284
5.3.6 Strategi untuk Ventilasi 285
5.3.7 Penanganan Resonansi 285
5.3.8 Pemilihan Bahan Akustik 286
5.4 Aspek Matematis **288**
5.4.1 Kecepatan Bunyi, V 288
5.4.2 Intensitas Bunyi, I 288
5.4.3 Tingkat Bunyi, LI, LP, LW 288
5.4.4 Kehilangan Transmisi (Transmisson Loss), TL 289
5.4.5 Waktu Dengung (Reverberation Time), TR. ... 289
5.4.6 Tingkat Tekanan Bunyi dalam Ruangan, Lp ... 290
5.4.7 Pengurangan Kebisingan (Noise Reduction), NR, dengan Penambahan Peredam 291
5.4.8 Kehilangan Transmisi Komposit (Composite Transmission Loss) 291
5.4.9 Pengurangan Kebisingan (Noise Reduction), NR, antara Dua Ruang 291
5.4.10 Pengurangan Kebisingan, NR, Oleh Penghalang Eksterior 292

5.5 Contoh-contoh Perhitungan 292
5.5.1 Penggandaan Bunyi 292
5.5.2 Menjumlahkan Bunyi 293
5.5.3 Menjumlahkan Bunyi Tanpa Menghitung 293
5.5.4 Penurunan Tingkat Bunyi oleh Jarak 294
5.5.5 Menghitung Waktu Dengung 295
5.5.6 Menghitung Pengurangan Tingkat Bunyi oleh Penghalang 298
5.5.7 Menghitung Kehilangan Transmisi Dinding... 300
5.5.8 Menghitung Pengurangan Kebisingan Bunyi oleh Dinding Komposit 301
5.5.9 Menghitung Tingkat Bunyi di Suatu Ruang oleh Sumber Bunyi di Ruang Lain 302
5.5.10 Menghitung Tingkat Kebisingan Suatu Ruangan oleh Sebuah Sumber Bunyi 303
5.6 Galeri 312
5.7 Alamat Internet 315
5.8 Software **315**

BAB 6 AKUSTIKA BUATAN **317**
6.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Akustik **318**
6.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar **325**
6.2.1 Peredaman Bunyi yang Efektif 334
6.2.2 Penempatan Loudspeaker 335
6.3 Aspek Perancangan **335**
6.3.1 Sistem Tata Suara Elektronik yang Efektif..... 336
6.3.2 Pertimbangan Akustika dalam Memilih Rumah 337
6.3.3 Bangunan Ibadah 339
6.3.4 Gedung Konser 343
6.3.5 Ruang Mesin dan Perlengkapan 345

6.4 Aspek Matematis 346
6.4.1 Jarak Loudspeaker ke Pendengar (untuk T < 2dtk) 346
6.4.2 Jarak (Distribusi) antarLoudspeaker 346
6.4.3 Loudspeaker Bunyi Latar (Background Masking) 346
6.4.4 Ketinggian Langit-langit Auditorium 347
6.4.5 Frekuensi Resonansi Panel Getar (Vibrating Panel) 347
6.5 Contoh Perhitungan 347
6.5.1 Menghitung Jarak Maksimum Loudspeaker ke Pendengar 347
6.5.2 Menghitung Jarak antarLoudspeaker 348
6.5.3 Menghitung Jarak antarLoudspeaker untuk Bunyi Latar 348
6.5.4 Menghitung Ketinggian Langit-langit Auditorium 349
6.5.5 Menghitung Resonansi Panel Getar 349
6.6 Galeri 350
6.7 Alamat Internet 353
6.8 Software 354

DAFTAR PUSTAKA 361

INDEKS 364

TENTANG PENULIS 372

1

BAB I
VENTILASI ALAMI

Ventilasi bangunan dapat berupa ventilasi alami (tidak melibatkan mesin), ventilasi buatan (melibatkan mesin pengondisi udara yang akan menurunkan suhu dan kelembaban udara, AC) dan ventilasi semi-buatan (ventilasi alami yang dibantu oleh kipas angin untuk menggerakkan udara tetapi tidak melibatkan alat penurun suhu). Ventilasi dibutuhkan agar udara di dalam ruangan tetap sehat dan nyaman. Baik aktivitas manusia maupun benda-benda di dalam ruang dapat menghasilkan gas-gas yang berbahaya bagi kesehatan bila tetap terkonsentrasi di dalam jumlah yang melebihi batas toleransi manusia. Udara yang kotor harus diganti dengan udara yang lebih bersih.

Ventilasi alami adalah pergantian udara secara alami (tidak melibatkan peralatan mekanis, seperti mesin penyejuk udara yang dikenal sebagai *air conditioner* atau AC). Ventilasi alami menawarkan ventilasi yang sehat, nyaman, tanpa memerlukan energi tambahan.

Namun untuk merancang ventilasi alami perlu dipikirkan syarat awal, yaitu: (1) tersedianya udara luar yang sehat (bebas dari bau, debu dan polutan lain yang mengganggu), (2) suhu udara luar tidak terlalu tinggi (maksimal 28°C), (3) tidak banyak bangunan di sekitar yang akan menghalangi aliran udara horizontal (sehingga angin dapat berhembus lancar), dan (4) lingkungan tidak bising. Jika syarat awal tidak dipenuhi sebaiknya tidak dipaksakan untuk memakai ventilasi alami karena justru akan merugikan. Dengan demikian ventilasi alami sebenarnya hanya cocok untuk daerah yang beriklim nyaman (*mild* atau *moderate*) dan tidak ekstrem (Liddament, 1996).

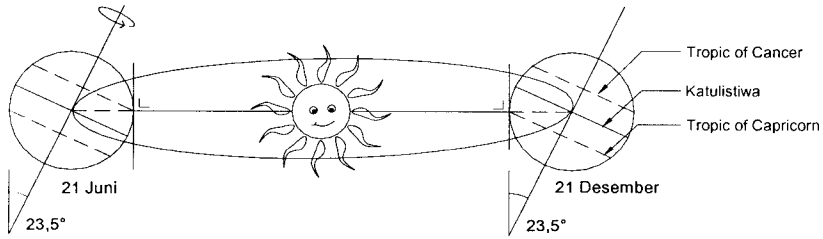
Jika prasyarat dasar di atas terpenuhi maka ventilasi alami memiliki beberapa nilai positif, yaitu: (1) hemat energi, (2) menghubungkan iklim di dalam ruang dengan luar ruang yang menciptakan suasana alami, (3) biaya pembuatan dan perawatan relatif murah dibanding ventilasi buatan, dan (4) tidak memerlukan ruang mesin.

Beberapa nilai negatif ventilasi alami adalah: (1) suhu tidak mudah diatur, (2) kecepatan angin tidak mudah diatur, (3) kelembaban tidak mudah diatur, (3) kualitas udara tidak mudah diatur (debu, bau, dan polusi lain), (4) gangguan serangga, (5) gangguan lingkungan (kebisingan dan lain-lain) sulit dicegah, (6) bukaan mungkin akan berisiko pada keamanan, dan (7) untuk bangunan yang bermassa gemuk maka ventilasi alami sulit menjangkau bagian tengah.

Sesuai dengan hakikatnya, kualitas ventilasi alami sangat tergantung pada kualitas udara lingkungan. Oleh karena itu pemahaman akan iklim dan cuaca menjadi sangat penting. Indonesia mempunyai iklim tropis lembab yang mempunyai ciri-ciri sebagai berikut:

- Tidak ada perbedaan yang jelas antara musim kering (kemarau) dan basah (hujan). Baik musim hujan maupun musim kering dapat berlangsung lama sehingga bisa terjadi tumpang-tindih musim.
- Suhu udara relatif tinggi dengan amplitudo suhu siang--malam kecil (24 - 32°C), walaupun suhu udara di daerah pegunungan dapat jauh lebih rendah dari angka tersebut.
- Kecepatan angin rendah (terutama pada pagi dan malam hari). Pada siang hari umumnya angin berhembus cukup kuat.
- Kelembaban udara tinggi (60 - 95%). Kelembaban yang tinggi ini menyebabkan kulit terasa lengket karena keringat yang tidak dapat dengan leluasa menguap sehingga menempel di kulit. Kondisi ini menyebabkan munculnya rasa tidak nyaman.
- Radiasi matahari cukup tinggi (>900 W/m^2), walau sering juga tertutup mendung (<100 W/m^2).
- Hujan deras dapat turun dalam beberapa hari berturut-turut, umumnya pada siang atau sore hari.
- Hampir selalu berawan. Langit sering berawan merata yang sangat menyilaukan mata dan menyebabkan perasaan tertekan.
- Flora beraneka ragam, tanah subur, tidak mengenal musim gugur. Jamur tumbuh dengan pesat.
- Fauna beraneka ragam, termasuk serangga pengganggu yang berbahaya, seperti nyamuk.

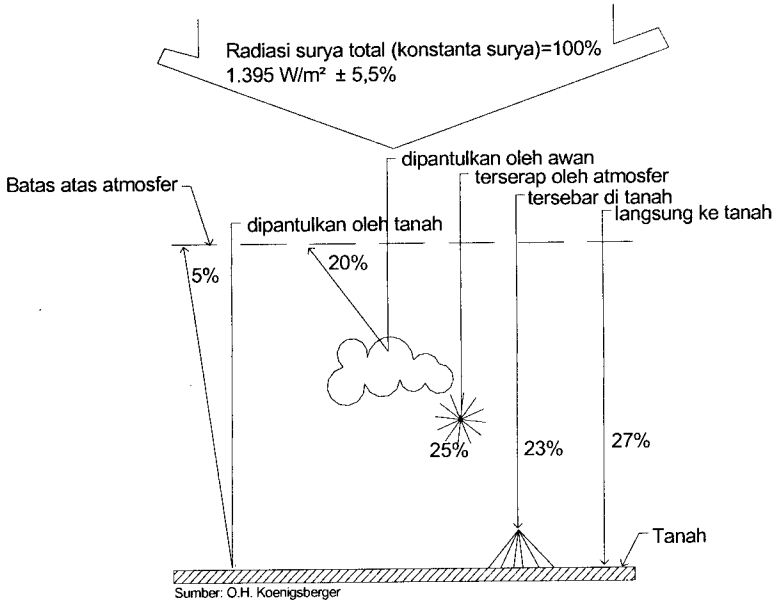
- Berdebu.
- Karat logam dan pelapukan organik mudah terjadi.
- Penduduknya mengembangkan budaya kehidupan di luar rumah (*outdoor living*).
- Pakaian ringan dan longgar. Bertelanjang dada dan kaki adalah hal yang wajar di hari panas.
- Tenaga mudah tersedot habis (kelelahan, *fatigue*). Untuk mengatasi keadaan yang tidak nyaman ini diperlukan *recovery* dalam bentuk tidur siang (*siesta*).



***Gambar 1.1** Matahari dan bumi*

Sumber panas terbesar bagi bumi adalah matahari. Bumi berputar mengelilingi sumbunya (berotasi) dalam waktu 24 jam, menciptakan malam dan siang hari. Selain itu bumi mengedari matahari (berevolusi) selama 365 hari (plus 5 jam, 48 menit, 46 detik), yang menciptakan musim. Bumi mengedari matahari dengan sumbu rotasi miring 66,5° terhadap bidang edar. Hal ini menyebabkan dari bumi terlihat seolah-olah matahari bergerak ke utara dan kembali ke selatan dan seterusnya kembali ke utara lagi. Begitu terus-menerus. Dalam waktu satu tahun, bumi mengelilingi matahari satu putaran. Karena posisi matahari yang seperti itu menyebabkan pemanasan yang berganti-ganti pada permukaan bumi, sehingga terciptalah iklim. Bila matahari berada di utara (sekitar Juni), maka belahan bumi utara akan mengalami musim panas, sedang belahan bumi selatan mengalami musim dingin. Bila matahari berada di selatan, (sekitar Desember) terjadi iklim sebaliknya. Garis balik utara (23,5° Lintang Utara) dinamai *Tropic of Cancer*, sedangkan garis balik selatan (23,5° Lintang Selatan) dinamai *Tropic of Capricorn*. Garis edar bumi berbentuk elips dengan jarak bumi matahari terdekat 147 juta km dan terjauh 152 juta km. Intensitas radiasi matahari yang sampai di

permukaan luar atmosfer bumi (dinamakan *Solar Constant*) adalah 1.395 W/m^2. Besaran itu bervariasi $\pm$ 2% yang disebabkan oleh kondisi permukaan matahari dan $\pm$3,5% karena jarak matahari ke bumi yang berubah-ubah. Matahari sejajar garis katulistiwa pada tanggal 21 Maret (ketika menuju ke utara) dan 21 September (ketika menuju ke selatan).



***Gambar 1.2** Sebaran radiasi matahari*

1.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Ventilasi

Sub-bab ini mengenalkan istilah yang umum ditemukan dalam pembahasan tentang ventilasi. Istilah yang lebih lengkap dapat ditemukan di:

http://www.epa.gov/iaq/glossary.html
http://www.airvent.com/homeowner/whyVent/glossary.shtml
http://www.sustainableenergycoalition.org/energy_glossary/ventilation.html

Ventilasi (lt. *Ventus*, *wind*, angin) adalah aliran udara, baik di ruang terbuka maupun tertutup (di dalam ruangan). Dalam konteks bangunan, ventilasi berarti pergantian udara kotor di dalam ruang dengan udara bersih (yang diharapkan dari udara luar). **Ventilasi alami** adalah proses pergantian

udara ruangan oleh udara segar dari luar ruangan tanpa bantuan peralatan mekanik. **Pergantian udara per jam** (ACH, *Air Change per Hour*) adalah jumlah pergantian seluruh udara di dalam ruangan dengan udara segar dari luar setiap jamnya. Semakin besar potensi kekotoran udara di suatu ruangan (misalnya laboratorium, bengkel, toilet, dan dapur), semakin tinggi angka pergantian udara per jam yang diharuskan. Setiap negara mempunyai standar ACH sendiri-sendiri.

Angin adalah udara yang bergerak. **Gaya penggerak angin** (*wind driving force*) adalah gaya yang menyebabkan udara bergerak. Udara bergerak karena adanya gaya yang diakibatkan oleh perbedaan **tekanan** (ΔP) dan perbedaan **suhu** (ΔT). **Gaya apung** (*buoyancy*, *stack effect*) adalah gaya gerak udara ke atas akibat perbedaan suhu. **Lapisan batas** (*boundary layer*) adalah lapisan udara antara permukaan bumi dan ketinggian tertentu ketika kecepatan angin tidak lagi terpengaruh oleh kondisi permukaan bumi. **Atmosfer** adalah lapisan udara yang melingkupi bumi.

Penilaian terhadap kualitas ventilasi diukur dengan standar **kenyamanan termal**. **Enam faktor kenyamanan termal** (4 faktor lingkungan + 2 faktor manusia) adalah:

- Suhu udara, **T** (*Temperature*), °C.
- Kecepatan angin, **V** (*Velocity*), m/dtk.
- Kelembaban udara, **RH** (*Relative Humidity*), %.
- Rata-rata suhu permukaan ruang, **MRT** (*Mean Surface Radiant Temperature*), °C, dan
- Aktivitas manusia, **met** (*Metabolism*), W/m^2. (1 met = 58,15 W/m^2 sering dibulatkan 58 W/m^2)
- Pakaian, **clo** (*clothing*), m^{2}degC/W (1 clo = 0,155 m^{2}degC/W).

Kelembaban Nisbi (RH, *Relative Humidity*) adalah perbandingan antara kandungan uap air pada suatu saat dengan kandungan uap air pada titik jenuh dalam suhu saat itu.

Penyejukan evaporatif (*evaporative cooling*) adalah penyejukan dengan memanfaatkan mekanisme pengurangan panas akibat penguapan air (atau zat lain). Untuk menguap, air membutuhkan panas, yang akan diambil dari lingkungan sekitarnya. Dengan demikian suhu lingkungan akan turun.

Air dalam bentuk kabut (*spray*) lebih mudah menangkap panas dari udara lingkungan sekitar. Namun apabila lingkungan lembab (seperti di Indonesia yang tropis lembab ini), udara tidak lagi 'haus' uap air sehingga penguapan tidak berlangsung dengan cepat. Keringat kita, misalnya, cenderung menempel di kulit dan menyebabkan perasaan lengket yang tidak nyaman. Sebaliknya, di iklim kering, penyejukan evaporatif akan sukses karena udara kering dan masih 'haus' uap air. Jadi musuh utama kenyamanan termal di iklim tropis lembab adalah kelembaban udara yang tinggi.

Penyejukan radiatif (*radiative cooling*) adalah penyejukan dengan memanfaatkan mekanisme radiasi. Pada daerah beriklim kering langit jernih (jarang berawan) maka pada malam hari permukaan bumi yang hangat dapat melepaskan panasnya secara radiasi ke langit yang dingin. Sedangkan di daerah iklim tropis lembab, langit hampir selalu berawan, sehingga benda-benda hangat sulit melepaskan panasnya.

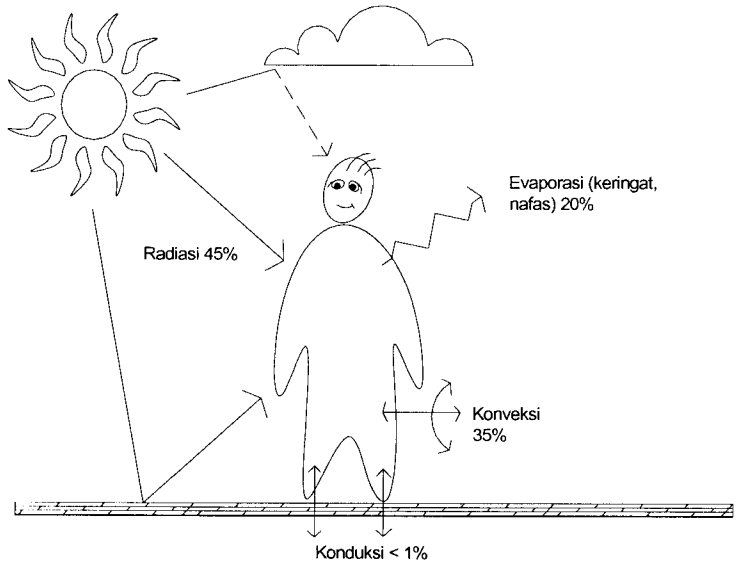
Penyejukan fisiologis (*physiological cooling*) adalah sensasi sejuk yang dirasakan manusia karena hembusan angin yang mengenai kulitnya. Tubuh membuang kelebihan panasnya melalui kontak dengan benda lain yang lebih dingin, uap nafas, dan penguapan keringat. Keringat di permukaan kulit akan cepat menguap apabila dihembus oleh angin, sambil membawa panas dari kulit, dan memberi tempat bagi keringat selanjutnya. Semakin cepat proses tadi maka semakin cepat panas dibuang sehingga tubuh menjadi sejuk. Kipas tangan dan kipas angin listrik dipergunakan untuk memperlancar proses penguapan keringat sehingga menimbulkan sensasi sejuk. (Luas kulit orang dengan berat badan 70 kg sekitar 1,7 m^2.)

Penyejukan konvektif (*convective cooling*) adalah penyejukan dengan memanfaatkan aliran angin. Bila benda hangat dilewati angin yang lebih sejuk maka akan terjadi perpindahan panas dari benda tersebut ke udara. Bila proses ini berlangsung terus-menerus maka akan menyebabkan benda tersebut menjadi sejuk karena panasnya (kalornya) diangkut oleh angin. Hal ini menjelaskan mengapa kita meniup bubur panas agar panasnya berkurang.

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses perpindahan kalor dari benda yang lebih panas ke benda lain yang kurang panas. Ada tiga cara perpindahan panas, yaitu:

- **Perpindahan panas konduktif** (*conductive heat transfer*) adalah perpindahan panas dari benda yang lebih panas ke benda yang kurang panas melalui kontak (sentuhan). Ketika tangan kita kedinginan maka kita suka memegang gelas berisi minuman hangat, bukan? Sebaliknya, di saat panas kita suka bertelanjang kaki di atas lantai yang sejuk.

- **Perpindahan panas konvektif** (*convective heat transfer*) adalah perpindahan panas dari benda yang lebih panas ke benda yang kurang panas melalui aliran angin (atau zat alir lainnya). Jika kita kegerahan maka kita suka mengipas tubuh kita, bukan?
- **Perpindahan panas radiatif** (*radiative heat transfer*) adalah perpindahan panas dari benda yang lebih panas ke benda yang kurang panas dengan cara pancaran. Kita merasa panas berada di bawah atap seng saat matahari terik, walaupun banyak angin. Mengapa? Karena suhu seng jauh di atas suhu tubuh kita sehingga seng memancarkan panasnya ke tubuh kita.

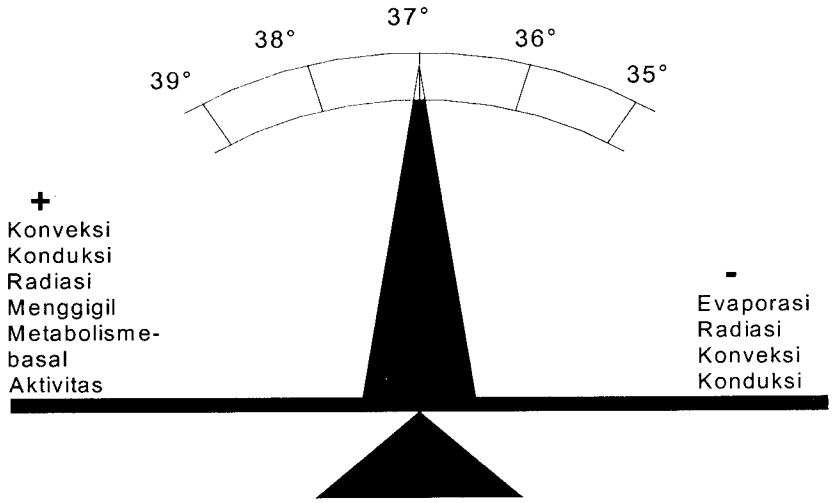


***Gambar 1.3** Perpindahan panas antara tubuh dan lingkungan*

Efek rumah kaca (*green house effect*) adalah efek yang diperoleh dalam rumah kaca untuk memelihara tanaman. Matahari bersuhu amat tinggi (permukaannya sekitar 6000°C, suhu intinya 15.000.000°C dan korona yang mengelilinginya pun bersuhu jutaan derajat Celsius), memancarkan gelombang pendek. Gelombang pendek dapat menembus kaca dan memanaskan

permukaan benda yang dikenainya. Permukaan tadi akan menjadi hangat dan memancarkan gelombang panjang. Gelombang panjang tidak dapat menembus kaca sehingga terpantul-pantul di dalam ruangan. Karena panas tidak dapat dibuang keluar maka ruangan menjadi panas. Gejala ini juga terjadi di atmosfer bumi. Gelombang panjang yang dipancarkan permukaan bumi akan dipantulkan kembali oleh lapisan udara atmosfer yang terkena polusi asap dari gas buang industri dan kendaraan bermotor. Hal ini mengakibatkan bumi menjadi semakin panas.

Skala sensasi termal (*thermal sensation scale*) adalah skala psiko-fisik tujuh titik mulai dari –3, -2 , -1, 0, +1, +2, +3 yang secara verbal disebut dingin, sejuk, agak sejuk, netral, agak hangat, hangat, panas. Dalam bahasa Inggris, *cold, cool, sligthly cool, neutral, slightly warm, warm, hot.* Jelaslah bahwa netral adalah kondisi yang paling baik.

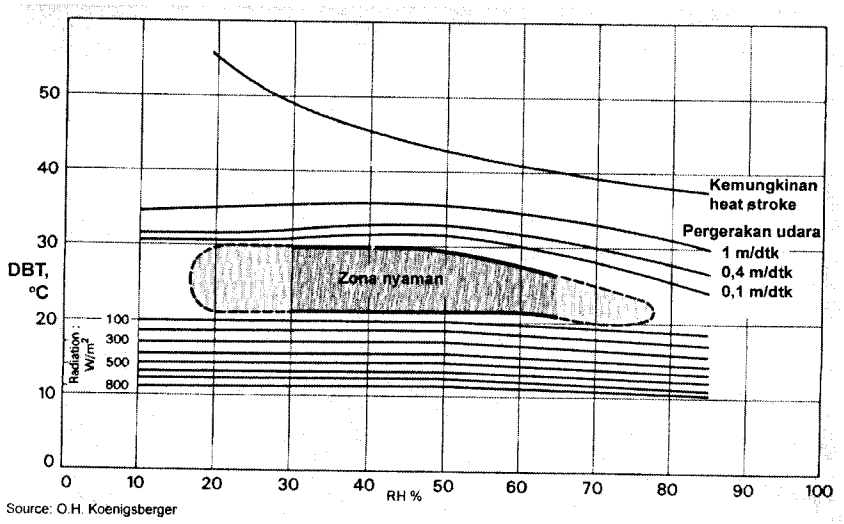


Sumber: O. H. Koenigsberger

Gambar 1.4 *Keseimbangan termal dalam tubuh manusia*

Zona nyaman (*comfort zone*) adalah daerah dalam *bioclimatic chart* yang menunjukkan kondisi komposisi udara yang nyaman secara termal. Kenyamanan termal tidak dapat diwakili oleh satu angka tunggal karena kenyamanan tersebut merupakan perpaduan dari enam faktor. Namun, sebagai pedoman kasar, kenyamanan termal untuk daerah tropis lembab dapat

dicapai dengan batas 24°C < T < 26°C, 40% < RH < 60%, 0,6 m/s < V < 1,5 m/s, pakaian ringan dan selapis, dan kegiatan santai tenang. Batas-batas tersebut berdasarkan pengalaman saja. Pada iklim tropis lembab yang suhu rata-ratanya cukup tinggi, antara 27°C hingga 32°C, suhu 24°C sudah terasa sejuk.



Gambar 1.5 *Analisis bioklimatik yang diperkenalkan oleh Givoni (Givoni, 1994; Koenigsberger, 1973)*

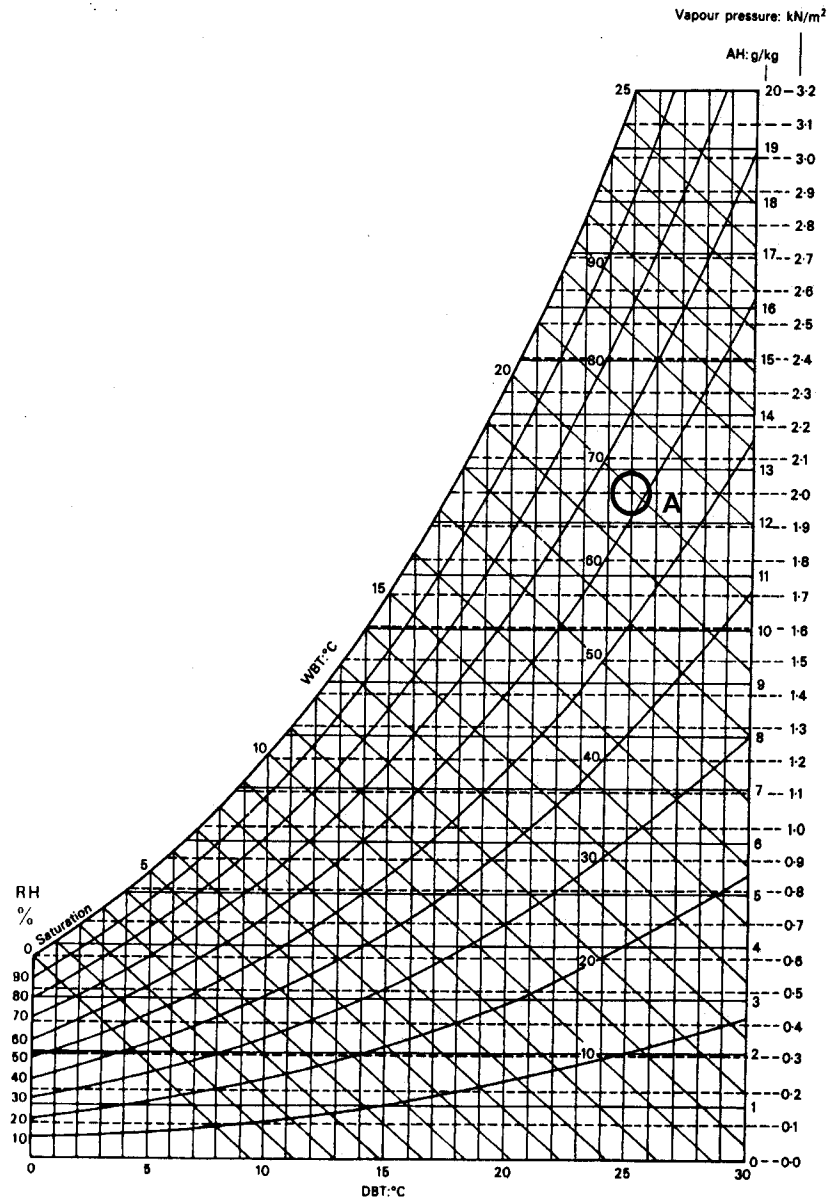
Kelambanan waktu (*time-lag*) adalah waktu yang diperlukan bagi panas untuk merambat dari satu sisi permukaan bidang ke sisi permukaan lain. Fenomena ini terjadi pada dinding tebal. Pada siang hari yang panas, matahari akan memanasi dinding. Karena dinding tebal, kapasitas panasnya besar, maka diperlukan waktu lama bagi dinding untuk menjadi panas. Dengan demikian sisi dalam dinding akan menjadi panas setelah waktu yang cukup lama, misalnya 8 jam. Ketika matahari terbenam, dinding mulai melepaskan panasnya kembali. Pada iklim tropis kering, suhu udara malam hari dapat rendah (dingin). Oleh karena itu panas yang dilepaskan dinding dapat menghangatkan ruangan. Ketika matahari terbit keesokan harinya, dinding sudah siap diisi panas lagi oleh matahari. Selama siang hari yang panas, suhu di dalam ruang akan tetap sejuk karena dinding masih dingin. Pada daerah panas kering, fenomena ini dimanfaatkan untuk menjaga ruangan tetap sejuk di siang hari yang panas dan tetap hangat di malam hari yang dingin. Oleh karena itu perpaduan antara dinding tebal dan jendela

kecil adalah ciri iklim kering. Untuk daerah tropis lembab, mekanisme ini tidak efektif karena perbedaan suhu siang dan malam hanya sedikit. Lagi pula kelembaban tinggi membutuhkan ventilasi yang selancar mungkin, yang berarti memerlukan bukaan yang seluas-luasnya.

Rumah-rumah peninggalan zaman kolonial sering memiliki ruangan besar, berlangit-langit tinggi, berdinding tebal (satu batu), dan beratap genting padat. Jika ruang ini hanya ditinggali oleh sedikit penghuni (misalnya dua orang untuk ruangan berukuran 5mx6mx4,5m dan tidak ada peralatan yang menjadi sumber panas tinggi) maka panas dari tubuh para penghuninya tidak akan cukup cepat untuk memanaskan udara ruangan, bahkan hingga matahari terbenam kembali. Itulah yang dinamakan *volume effect*, yang menyebabkan bangunan tetap sejuk sepanjang hari (dengan jendela tertutup). Namun bila di dalam ruangan itu ada banyak penghuni dan peralatan penghasil panas maka dalam beberapa menit saja sudah akan menjadi tidak nyaman.

Jendela ganda terdiri atas jendela kaca di sebelah dalam dan jendela *krepyak* di sebelah luar, sangat bagus digunakan di iklim tropis lembab. Pada siang hari jendela krepyak dapat dibuka. Jika tidak diperlukan ventilasi, jendela kaca dapat ditutup sehingga cahaya alami tetap masuk. Di malam hari, jika gerah, jendela kaca dapat dibuka, sementara jendela krepyak ditutup. Dengan demikian ventilasi tetap berlangsung sementara privasi tetap terjaga. Karena kemampuannya untuk menyelesaikan konflik ventilasi di daerah tropis, jendela ganda sering dianggap sebagai ciri arsitektur tropis, terutama Indonesia (Lippsmeier, 1969; Kukreja, 1978; Mangunwijaya, 1980; Drew, 1982; Beng, 1994; Dawson, 1994).

Diagram psikrometri (*Psychrometric chart*) adalah diagram yang menunjukkan properti udara. Setiap titik pada diagram tersebut menunjukkan suhu bola kering (DBT, *dry bulb temperature*), suhu bola basah (WBT, *wet bulb temperature*), kelembaban relatif (RH, *relative humidity*), kelembaban absolut (AH, *absolute humidity*) dan tekanan uap (*vapour pressure*). Selisih suhu bola kering dan suhu bola basah akan menunjukkan kelembaban udara pada saat bersangkutan. Jika suhu kedua bola sama, itu berarti kelembaban relatif 100%. Uap air akan segera mengembun. Misalkan suhu bola kering dan bola basah sama-sama tercatat 25°C, maka dari diagram psikrometri dapat dilihat bahwa kelembaban relatif saat itu 100%. Jika suhu bola kering 25°C sedang suhu bola basah 20°C, maka kita dapat memotongkan kedua garis suhu itu untuk menemukan kelembaban relatifnya, yaitu sekitar 63%. Pada saat itu tekanan uapnya 20 kN/m^2. Lihat titik A pada Gambar 1.6.



Gambar 1.6 Psychrometric chart

Sifat Bahan (*Material properties*) adalah sifat fisik khas suatu bahan. Beberapa sifat bahan yang relevan dalam perpindahan panas adalah:

- **Konduktivitas** (*Conductivity*, k) adalah bilangan yang menunjukkan besar panas (watt) yang mengalir melalui bahan setebal 1 m, seluas 1 m^2 dengan perbedaan suhu antara kedua sisi permukaan 1 degC (derajat Celsius). Jadi satuan konduktivitas adalah Wm/m^2degC. Karena kita seringkali memerlukan bahan dengan tebal nyata maka dibuatlah istilah konduktan (*conductance*) yang merupakan konduktivitas untuk tebal tertentu (bukan 1 m). Hal ini karena pada kehidupan nyata, misalnya, kita tidak pernah memakai genting setebal 1 m. Konduktan = k/b dengan b adalah tebal bahan normal. (Sebagai contoh, genting tanah liat mungkin b = 6 mm = 0,006 m saja.) Jadi satuan konduktan adalah k/b = $(Wm/m^2degC)/m = W/m^2degC$. (Untuk mudahnya, konduktivitas diberi notasi **k**, sedangkan konduktan **k'**)
- **Resistivitas** (*Resistivity*, R) adalah kebalikan dari konduktivitas (R = 1/k) dengan satuan mdegC/W. Sebaliknya, resistan merupakan kebalikan konduktan, b/k, dengan satuan m^2degC/W. (Untuk mudahnya, resistivitas diberi notasi **R**, sedangkan resistan **R'**.)

Karena elemen bangunan biasanya terdiri atas beberapa bahan, maka sifat gabungannya bisa merupakan gabungan dari sifat individual bahan. Dalam hal ini konduktan tidak dapat dijumlahkan secara langsung. Jadi yang dijumlahkan adalah resistannya. Dengan demikian untuk elemen bangunan yang terdiri atas beberapa lapis maka kita dapat menghitung konduktan sebagai $k'_b = 1/R'_b = 1/(R'_1 + R'_2 + R'_3 + \ldots + R'_n) = 1/(1/k'_1 + 1/k'_2 + 1/k'_3 + \ldots + 1/k'_n)$.

Konduktan permukaan (*air film conductance*) adalah konduktan lapisan udara tipis antara udara dengan permukaan bahan, biasa diberi notasi **f**. Konduktan permukaan ini memengaruhi perpindahan panas dan nilainya tergantung dari kondisi permukaan dan lokasinya (apakah di dalam ruangan atau di luar ruangan). Karena kita dalam kehidupan sehari-hari tidak dapat mengabaikan konduktan permukaan, maka dalam ilmu bangunan dibuatlah angka konduktan elemen bangunan yang sudah memasukkan faktor konduktan permukaan dan dinamai **Transmitan** (*transmittance*), $U = 1/R'_a$. Sedang $\mathbf{R'_a}$ adalah resistan elemen yang sudah memasukkan unsur lapisan tipis udara tadi, $R'_a = 1/f_o + R'_b + 1/f_i$ m^2degC/W (f_o adalah konduktan permukaan luar elemen bangunan, sedangkan f_i konduktan permukaan dalam).

Absorpsi (*absorption*, penyerapan) adalah kemampuan benda menyerap radiasi matahari. **Bilangan serap** (α) menunjukkan berapa bagian radiasi yang datang diserap. Sebagai contoh, α = 0,7 menunjukkan bahwa 0,7 bagian radiasi akan diserap dan 0,3 akan dipantulkan. Radiasi matahari (gelombang pendek) yang diserap ini akan menjadi panas dan menyebabkan suhu benda bertambah. Panas ini akan dibuang (dipancarkan) kembali dalam bentuk gelombang panjang. Kemampuan bahan untuk memancarkan panas kembali dinamakan **emisivitas**, biasanya diberi notasi **e**. Misalnya, sebuah bahan memiliki e = 0,8 berarti 0,8 panas akan dipancarkan kembali ke lingkungan sekitar. Proses ini menyebabkan suhu turun. Oleh karena itu sebenarnya panas yang tertahan benda adalah $(\alpha)(1\text{-}e) = (0,7)(1\text{-}0,8)$

$= (0,7)(0,2)$

$= 0,14.$

panjang (*length*)	= meter (m)	
massa(*mass*)	= kilogram (kg)	
waktu(*time*)	= detik (s)	
kecepatan (*velocity*)	= m/s	
percepatan (*acceleration*)	= (m/s)/s	$= m/s^2$
gaya (*force*)	$= kg\ m/s^2$	= Newton
usaha (*work*)	$= kg\ m/s^2\ m$	= Newton.m = Joule
energi (*energy*)	$= kg\ m/s^2\ m$	= Newton.m = Joule
daya (*power*)	= Joule/dtk	= Watt
Kecepatan aliran panas (*Heat flow rate*)		= W
Kerapatan aliran panas (*Density of heat flow*)		$= W/m^2$
Konduktivitas (*Conductivity*), k = Wm/m^2degC		= W/mdegC
Konduktan (*Conductance*), k'		$= W/m^2degC$
Resistivitas (*Resistivity*), R		= mdegC/W
Resistan (*Resistance*), R'		$= m^2degC/W$

Kualitas udara ruangan (*indoor air quality*, IAQ) adalah kondisi kandungan udara di dalam ruangan yang dapat memengaruhi kesehatan dan kenyamanan penghuni suatu bangunan. Udara tersusun dari nitrogen (78%), oksigen (20,95%), argon (0,93%), karbondioksida (0,038%), uap air (1%) serta gas-gas lain (0,002%). Komposisi kimiawi tersebut dapat berubah karena adanya gas-gas yang dilepaskan oleh benda-benda (misalnya cat baru, obat nyamuk bakar, kapur barus) atau aktivitas manusia (misalnya: memasak,

merokok). Proses pembakaran yang tidak sempurna, misalnya, akan melepaskan banyak gas karbon monoksida yang berbahaya. Selain bahan kimia, udara juga dapat mengandung partikel organik (bakteri, spora jamur) dan non-organik (debu). Peningkatan kandungan zat-zat ke udara tentu tidak dapat dihindari dan memang diperbolehkan sampai pada tingkat tertentu. Jika tingkat tersebut terlampaui, udara akan menjadi tidak sehat atau bahkan berbahaya. Unsur-unsur tambahan yang berpotensi mengganggu disebut **polutan**. Udara di dalam ruangan yang berventilasi buruk dapat menyebabkan gangguan bagi penghuninya, seperti gangguan pernafasan, pusing, iritasi mata dan sebagainya. Gejala gangguan kesehatan akibat ventilasi bangunan yang buruk sering disebut sebagai *sick building syndrome*.

Untuk memberi kepastian agar kualitas udara selalu terjaga dari pencemaran yang mengancam kelestarian lingkungan hidup, maka pemerintah dibantu para ahli lingkungan menerbitkan **baku mutu udara ambien,** yaitu ukuran batas atau kadar zat, dan/atau komponen yag ada atau yang seharusnya ada dan/atau unsur pencemar yang ditenggang keberada-annya dalam udara ambien dalam kurun waktu tertentu. Setiap daerah menerbitkan baku mutu ambien yang sesuai dengan kondisi daerah itu.

Global warming (**pemanasan global**) adalah kenaikan suhu rata-rata udara di dekat permukaan bumi dan lautan pada beberapa dasawarsa terakhir yang masih terus berlanjut. Pemanasan global menyebabkan perubahan iklim dan pencairan es kutub serta pegunungan. **Perubahan iklim** (*climate change*) menyebabkan banyak masalah seperti kegagalan panen dan timbulnya tornado di luar normal. Pencairan es kutub dan pegunungan akan menyebabkan kenaikan permukaan laut yang akan menenggelamkan dataran rendah. Pemanasan global diyakini (90%) diakibatkan oleh pembakaran bahan bakar fosil (IPCC, 2007). Penyebab global adalah karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan nitro oksida (N_2O). Sebenarnya bumi membutuhkan selimut CO_2 di atmosfernya, karena jika tidak maka suhu bumi bisa turun hingga -18°C. Namun terlalu banyak CO_2 juga akan menyebabkan panas menjadi tidak dapat dilepas ke angkasa sehingga suhu di dekat permukaan bumi jadi meningkat. Penghasil CO_2, CH_4 dan N_2O terbanyak adalah peternakan dan limbah peternakan (Pimentel, 2003; UN News Centre, 2006; U.S. E.P.A, 2006; Steinfeld, 2006). Salah satu penyumbang terbesar gas rumah kaca adalah peternakan.

Tabel 1.1 *Contoh Baku Mutu Udara Ambien: Daerah Istimewa Yogyakarta*[1]

Parameter	Waktu pengukuran (jam)	BMUA Primer[2] (µg/m³)	BMUA Sekunder[3] (µg/m³)
SO_2 (sulfur dioksida)	1	900	1.300 (3 jam)
CO (karbon mono oksida)	1	30.000	
NO_2 (nitrogen dioksida)	1	400	100 (setahun)
O_3 (ozon)	1	235	235
KOV=VOC=HC total (Karbon organik volatile = Volatile organic carbon = Hidrokarbon total)	3	160	
PM_{10} (Partikulat diameter ≤ 10 mikron)	24	150	150
$PM_{2,5}$ (Partikulat diameter ≤ 2,5 mikron)	24	65	65
Pb (Timbal/Timah hitam)	24	2	1.500 (3 bulan)
TSP (Total partikel tersuspensi/debu)	24	230	230
Debu jatuh: a. Pemukiman b. Kawasan Industri	 30 hari 30 hari	 10 ton/km² 20 ton/km²	 10 ton/km² 20 ton/km²
Klorin	1	3.130	

Industri peternakan menyumbang gas rumah kaca hingga 18%, sedang transportasi 13,6%. Ini dikarenakan industri peternakan menghasilkan CH_4 (metana) dan N_2O (nitro oksida) yang mempunyai potensi gas rumah kaca 21 dan 310 kali lebih besar dibanding CO_2. Fakta tersebut jarang dipublikasikan. Media lebih banyak menyoroti transportasi sebagai penyebab gas rumah kaca. Jika penambahan gas rumah kaca tidak dihentikan maka akan terjadi perubahan iklim yang membawa banyak bencana, seperti kegagalan panen, banjir dan suhu yang semakin tidak nyaman. Ventilasi alami pun semakin sulit diterapkan.

[1] Disingkat dari Lampiran Keputuran Gubernur Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 153 Tahun 2002 tanggal 28 Oktober 2002. Angka pada tabel ini lebih besar daripada tabel yang dikeluarkan oleh negara maju (ASHRAE Standard 62-1989; Awbi, 1991).

[2] Untuk melindungi manusia

[3] Untuk melindungi hewan, tumbuh-tumbuhan, jarak pandang dan kenyamanan serta benda cagar budaya

Tabel 1.2 *Kenaikan kandungan gas rumah kaca (Kirby, 2008).*

Gas name	Pre-industrial concentration (ppmv *)	Concentration in 1998 (ppmv)	Atmospheric lifetime (years)	Main human activity source	GWP **
Water vapour	1 to 3	1 to 3	a few days	-	-
Carbon dioxide (CO_2)	280	365	variable	Fossil fuels, cement production, land use change	1
Methane (CH_4)	0,7	1,75	12	Fossil fuels, rice paddies waste dumps, livestock	21
Nitrous oxide (N_2O)	0,27	0,31	114	Fertilizers, combustion industrial processes	310
HFC 23 (CHF_3)	0	0,000014	250	Electronics, refrigerants	12 000
HFC 134 a (CF_3CH_2F)	0	0,0000075	13,8	Refrigerants	1 300
HFC 152 a (CH_3CHF_2)	0	0,0000005	1,4	Industrial processes	120
Perfluoromethane (CF_4)	0,0004	0,00008	>50 000	Aluminium production	5 700
Perfluoroethane (C_2F_6)	0	0,000003	10 000	Aluminium production	11 900
Sulphur hexafluoride (SF_6)	0	0,0000042	3 200	Dielectric fluid	22 200

ppmv = parts per million by volume; GWP = Global warming gas potential

Tabel 1.3 *Hubungan aktivitas dan produksi karbon dioksida (BS 5925 dalam Liddament, 1996)*

Aktivitas	Tingkat Metabolis (watt)	Tingkat produksi CO_2 (l/dtk)
Amat ringan	100	0,004
Ringan	150 – 300	0,006 – 0,012
Normal	300 – 500	0,012 – 0,020
Berat	500 – 650	0,020 – 0,026
Sangat berat	650 – 800	0,026 – 0,032

Menurut Givoni (1998) perkembangan *urban heat islands* dipengaruhi oleh (1) keseimbangan neto radiasi, (2) penyimpanan energi matahari di massa bangunan, (3) penimbul panas yang terkonsentrasi, (4) penguapan dari tanah dan tumbuhan di area terbangun perkotaan yang lebih rendah, dan (5)

sumber-sumber panas musiman seperti mesin penyejuk udara dan lampu. Givoni menyarankan bahwa untuk mengurangi *urban heat islands* perlu dipikirkan (1) warna bangunan, (2) jumlah distribusi tetumbuhan perkotaan, (3) energi yang digunakan untuk penyejukan udara, (4) kepadatan area terbangun, (5) tipe bangunan, dan (6) orientasi jalan. Aynsley et. al (1999) menunjukkan dua prinsip utama perencanaan strategis dalam mengatasi pemanasan lingkungan, yaitu peneduhan perkerasan pada ruang-ruang publik dan menjaga kelangsungan hembusan angin. Selain itu diperlukan pula tindakan:

Mengurangi gas-gas rumah kaca yang dikeluarkan oleh kegiatan industri karena gas-gas tersebut telah terbukti ikut menaikkan suhu udara karena menyerap radiasi matahari (Albritton, 2001; Barry, 1999). Mengingat konsep tumbuh cepat dapat mengundang variasi kegiatan tak terduga, seperti industri berskala kecil yang kemudian berkembang menjadi besar, maka sejak awal potensi produksi gas rumah kaca harus diantisipasi dengan penerapan peraturan buangan limbah industri yang ketat.

Menciptakan lingkungan yang lebih sejuk menggunakan efek psikologis. Warna-warna sejuk dan alami, bunyi-bunyi yang tidak terlalu bising dan alami dapat menghadirkan efek positif pada pikiran manusia yang secara tidak langsung mengompensasi ketaknyamanan termal (Edwards, 1996; Robinette, 1983; Simonds, 1993).

Salah satu cara agar penambahan kepadatan bangunan di suatu kawasan tidak menyebabkan kenaikan suhu lingkungan adalah dengan menjaga agar permukaan basah (*wet*) dan hijau (*green*) tetap memiliki porsi yang besar. Permukaan basah dapat berupa kolam (*pond*), sungai, dan lain-lain. Permukaan basah ini mengalami kenaikan suhu yang lebih rendah dibanding permukaan kering bila terkena radiasi matahari yang sama. Permukaan hijau adalah permukaan dengan tetumbuhan. Di bawah radiasi matahari yang sama, daun mengalami kenaikan suhu lebih kecil dibanding permukaan benda mati (*conblock*, aspal, rabat, dll.) karena energi matahari diserap dan dipergunakan dalam proses fotosintesis (dikonversi menjadi energi lain). Selain itu dedaunan akan mempertahankan suhu mereka hingga sekitar 40°C dengan menguapkan air (evapo-transpirasi). Pada keadaan panas terik, daun memerlukan lebih banyak air untuk diuapkan. Jika kekurangan air maka suhu daun akan melampaui suhu toleransi sehingga daun akan menjadi layu (mati).

Pada benda mati, terutama yang berwarna gelap, radiasi matahari akan diserap sehingga suhu benda tersebut akan naik. Benda yang panas ini akan memancarkan panasnya kembali (emisi) ke lingkungan sekitar sehingga suhu lingkungan menjadi naik. Perbedaan suhu antara permukaan daun dan beton dapat mencapai 22°C. Selain mengurangi kenaikan suhu lingkungan, tetumbuhan juga menjadi peredam bunyi (*sound absorber*, bukan *sound barrier*), peregulasi O_2 dan CO_2, peredam silau (warna tetumbuhan alami dan secara psikologis menyejukkan) dan dapat bernilai ekonomis (buah, daun, dll.)

Selain mengendalikan kenaikan suhu lingkungan oleh pertambahan kepadatan bangunan, menjaga agar aliran angin tetap lancar juga harus diusahakan. Apalagi angin di iklim tropis lembab cenderung minim; biasanya hanya berhembus agak kuat di siang hari atau pada musim pancaroba. Kelembaban yang tinggi menyumbang ketidaknyamanan termal sehingga harus diimbangi dengan kecepatan angin yang cukup dan menerus. Untuk itu konsep dasar massa bangunan di iklim tropis lembab adalah tersebar (tidak saling berhimpitan). Oleh karena itu jarak antarmassa menjadi penting, berupa aturan sempadan. Mengingat kecepatan angin meningkat sesuai dengan ketinggian, maka bangunan berlantai lebih dari satu akan menempatkan ruang-ruang di atas pada arus angin yang lebih cepat. Jika ini digabungkan dengan bukaan-bukaan lebar, potensi timbulnya **ventilasi silang** (*cross ventilation*) akan lebih besar. Jika ventilasi alami dapat banyak dimanfaatkan maka kebutuhan akan ventilasi buatan yang memerlukan banyak energi listrik dapat diminimalkan.

1.2 Memperkirakan Kecepatan dan Arah Angin, Suhu dan Kelembaban

Pada bagian ini akan dibahas bagaimana memperkirakan kecepatan angin, arah angin, suhu dan kelembaban. Masing-masing bagian akan dibahas secara lebih rinci pada sub-subbab berikut ini.

1.2.1 Memperkirakan Kecepatan Angin

Untuk mengukur kecepatan angin dapat dilakukan dengan **anemometer**. Namun, kecuali kita memang berprofesi sebagai pengukur kecepatan angin, alat tersebut sering tidak tersedia. Sebagai ganti, tabel berikut dapat digunakan untuk memperkirakan kecepatan angin, yang dilakukan dengan mengamati fenomena yang terjadi di sekitar kita. Sedangkan arah angin dapat dengan mudah dilihat lewat gerak asap. Di lapangan terbang, arah angin dapat dilihat dari arah kaos angin (*wind sock*). Zaman dulu sering ada hiasan ayam jantan di atas atap yang akan berputar menunjukkan arah angin. Data

keadaan suhu, arah angin, kelembaban, dan curah hujan kota-kota besar dapat diperoleh dari Kantor Meteorologi dan Geofisika, atau dalam bentuk data statistik dari publikasi Kantor Statistik. Bila tidak ada, cobalah ke website NASA:

`(http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen).`

***Tabel 1.4** Skala gaya-angin beaufort*

Gaya	Efek yang dapat dilihat	Kecepatan angin, m/dtk (km/jam)
0	Tidak ada angin, asap membubung tegak lurus, permukan air danau tenang	< 0,5 (3,6)
1	Pergerakan udara lemah, asap sedikit condong	1,7 (6,1)
2	Hembusan angin sepoi-sepoi basa, daun gemerisik	3,3 (11,9)
3	Angin lemah, ranting-ranting bergerak, riak kecil di air	5,2 (18,7)
4	Angin sedang, cabang kecil bergerak	7,4 (26,6)
5	Angin kuat, cabang besar bergerak, suara keras, ombak berbuih putih	9,8 (35,3)
6	Angin sangat keras, daun-daun terlepas, berjalan agak sulit	12,4 (44,6)
7	Angin puyuh, batang pohon kecil melengkung, ranting patah	15,2 (54,7)
8	Angin puyuh kuat, cabang pohon mungkin patah, cabang yang lebih besar melengkung	18,2 (65,5)
9	Angin puyuh sangat kuat, pohon kecil tercabut, genting beterbangan, bangunan rusak	21,4 (77)
10	Topan, bangunan berat rusak, pohon tumbang atau tercabut	25,1 (90,4)
11	Topan badai, bangunan hancur, seluruh hutan tercabut, manusia dan hewan dapat terbawa	29,0 (104,4)
12	Topan badai seperti di atas, tetapi lebih hebat lagi	>29,0 (104,4)

Sumber: Koenigsberger

Bentuk angin mempunyai beragam nama, antara lain (Melaragno, 1982): *Cyclone* adalah angin yang berpilin (diameter 50 – 1600 km) ke arah pusat, bertekanan atmosfer rendah, dengan putaran berlawanan arah jarum jam di belahan bumi utara dan searah jarum jam di belahan bumi selatan. Karena tekanan rendah umumnya menciptakan awan dan hujan, cyclone sering disebut sebagai badai (*storm*). Badai dengan kecepatan >120 km/jam, seperti badai tropis (*tropical cyclone*), dinamakan *hurricane*. *Tornado* adalah badai terdahsyat, lebih dahsyat dari *hurricane*, walau diameternya hanya 50 km (diameter minimum *cyclone*) dan sering terjadi di Amerika. Kecepatan berputarnya mencapai 510 km/jam dan membentuk pusaran mengerucut. *Typhoon* adalah *hurricane* di Lautan Pasifik.

1.2.2 Memperkirakan Suhu Udara

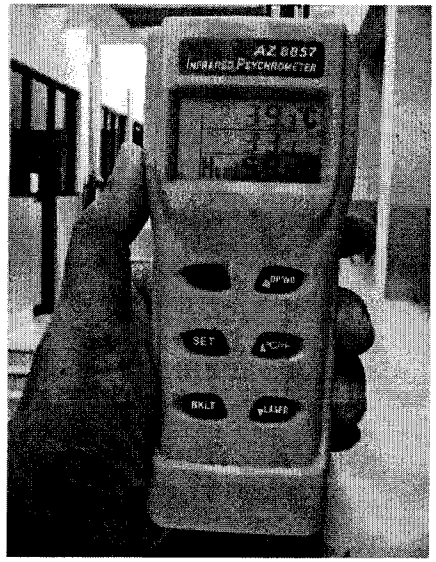
Suhu udara cukup mudah dan murah diukur dengan **termometer** ruangan yang tersedia di toko kelontong sekalipun. Termometer murah, walau mungkin tidak terlalu akurat, dapat digunakan untuk keperluan sehari-hari. Termometer jenis itu dinamakan **Termometer Bola Kering** (*Dry Bulb Thermometer*). **Termometer Bola Basah** (*Wet Bulb Thermometer*) adalah termometer yang dilengkapi dengan bahan basah/lembab (dari sepon atau kapas) di bolanya. Bila bahan basah ini dihembus angin (dengan cara memutar termometer tersebut, atau memberikan kipas untuk memberinya aliran angin) maka akan terjadi penguapan. Kecepatan menguap ini dipengaruhi oleh kelembaban udara. Oleh karena itu suhu yang dicatat oleh kedua termometer tersebut dapat digunakan untuk mengukur kelembaban udara dengan melihat diagram psikrometri (***Gambar 1.6***).

Memperkirakan suhu udara dengan cara kira-kira cukup sulit karena kemampuan adaptasi tubuh. Penulis telah mengamati bertahun-tahun untuk kondisi Yogya. Orang mulai mengeluh apabila suhu di atas 29°C. Mereka merasa cukup nyaman di suhu 27°C. Apabila mulai banyak yang memakai jaket atau *sweater,* biasanya suhu turun hingga 24°C. Sebaliknya, ketika penulis mengamati di Selandia Baru, ketika orang mulai memakai celana pendek, rupanya suhu mulai di atas 15°C, yang bagi orang Yogya tentu cukup dingin. Angin juga sering menipu perasaan kita tentang suhu udara. Ketika banyak angin, kita merasakan lebih nyaman dan sejuk, walau suhu udaranya sama.

1.2.3 Memperkirakan Kelembaban Udara

Kelembaban relatif udara (RH) dapat diukur langsung dengan **hygrometer** (selain dengan membandingkan suhu termometer bola kering dan basah). Alat tersebut cukup mudah didapat dan murah, biasanya menjadi satu dengan termometer dan namanya menjadi **thermo-hygrometer**. Untuk memperkirakan kelembaban relatif udara tanpa alat tersebut cukup sulit. Namun sesuai pengalaman penulis, apabila kita merasa kulit kita lengket, maka RH sudah di atas 80%. Bila kulit terasa lengket sekali dan udara pengap (terasa berat menekan), maka RH di atas 90%. Persis perasaan kita di kamar mandi sehabis mandi dengan air hangat. Bila kita merasa nyaman dan kulit kering wajar, RH sekitar 50 - 60%. Turun di bawah 40% kita mulai merasakan kering yang tidak wajar. Kulit mulai terasa sangat kering dan cenderung bersisik, bibir mulai kering dan mata pedas. Kertas foto yang tergantung

bebas akan mulai melengkung. Bila kelembaban dikurangi terus, maka akan terjadi gejala elektrostatis berupa loncatan listrik statis dari satu objek ke objek lain. Walau tidak berbahaya, gejala ini sering mengejutkan karena tiba-tiba ada loncatan listrik antara kursi logam dan tubuh kita.



Gambar 1.7 *Contoh alat ukur yang dapat digunakan untuk mengukur suhu permukaan (memakai sinar merah-infra), suhu udara, kelembaban udara dan titik embun. Alat seperti ini biasanya dilengkapi dengan pengarah dari laser.*

1.3 Ringkasan Pengetahuan Dasar

Sub-bab ini akan memberikan ringkasan pengetahuan dasar yang bermanfaat untuk memahami ventilasi lebih jauh.

Kenyamanan dan perasaan nyaman adalah penilaian komprehensif seseorang terhadap lingkungannya. Oleh karena itu kenyamanan tidak dapat diwakili oleh satu angka tunggal. Kita menilai kondisi lingkungan berdasarkan rangsangan yang masuk ke diri kita melalui keenam indera kita yang oleh syaraf dibawa ke otak dan dinilai. Dalam hal ini yang terlibat tidak hanya masalah fisik biologis, namun juga perasaan. Suara, cahaya, bau, suhu, dan lain-lain rangsangan ditangkap sekaligus, kemudian diolah oleh otak. Kemudian otak akan memberikan penilaian relatif apakah kondisi itu

nyaman atau tidak. Kekurangan (ketidak-nyamanan) di satu faktor dapat ditutupi oleh faktor lain. Jadi jelaslah di siang hari yang panas dan gerah, kita lebih suka mendengar musik yang lembut, tenang serta pelan, dilingkupi cahaya yang agak redup, warna-warna sekeliling hijau alami, memakai pakaian yang tipis santai, dan bergerak pelan. Bandingkan dengan situasi gerah dilengkapi dengan musik cadas keras, warna-warna cerah merangsang, serta gerak yang semrawut berlebihan. Suasana akan menjadi tambah panas dan mengundang stres. Semakin aktif gerak tubuh maka panas yang dipancarkan akan semakin besar.

Beberapa faktor lain yang sering dikaitkan dengan kegemaran akan kenyamanan tertentu, misalnya:

- Ras; sebenarnya tidak ditemukan bukti bahwa ras memengaruhi penilaian akan kenyamanan. Manusia mempunyai kemampuan adaptasi terhadap iklim (aklimatisasi) dengan baik. Normalnya orang dapat menyesuaikan diri dalam waktu 2 minggu.
- Jenis kelamin; perempuan pada umumnya menyukai lingkungan yang 1°C lebih hangat daripada laki-laki.
- Usia; orang berusia lanjut lebih suka di lingkungan yang lebih hangat dan tidak berangin. Hal ini disebabkan kemampuan metabolisme tubuh orang berusia lanjut cenderung menurun.

Tubuh manusia hangat oleh pembakaran makanan. Hanya 20% dari energi yang kita peroleh dari makanan dijadikan gerak, sedang yang 80% dijadikan panas untuk mempertahankan agar kita tetap hidup. Tubuh memerlukan mekanisme pembuangan agar tidak kelebihan panas. Ketika manusia bergerak lebih aktif, dia memancarkan lebih banyak panas. Dalam keadaan berbaring tenang dikatakan mempunyai nilai met = 0,8. Sebaliknya, ketika berolahraga lari 15 km/jam, nilai met menjadi 9,5.

Selain keringat, nafas, dan kulit, darah juga berperan aktif dalam proses perpindahan panas. Pada saat kepanasan, darah akan mendekati kulit untuk membuang panas. Karena itu kulit orang yang terang akan kelihatan merah apabila terkena panas matahari. Sebaliknya, dalam keadaan dingin, misalnya kita berendam di air dingin, kulit kita akan memucat. Rupanya darah menjauh dari kulit agar tidak lebih banyak panas yang hilang.

Kulit merasakan panas atau dingin berdasarkan kecepatan panas yang melaluinya. Jika kita menyentuh benda yang lebih dingin dari kulit kita maka

akan terjadi perpindahan panas dari kulit ke benda tadi. Semakin besar kecepatan perpindahan panas ke benda tadi, semakin dinginlah benda tadi kita rasakan. Namun apabila benda tadi bersifat isolator panas, seperti kayu atau styrofoam, perpindahan panas dari kulit tidak lancar (atau bahkan tidak terjadi). Akibatnya, kita merasakan benda tadi tidak dingin. Sebaliknya, apabila kita menyentuh benda logam yang bersuhu sama dengan kayu tadi, kita merasakannya lebih dingin karena terjadi perpindahan panas dari kulit kita ke logam tadi.

Pakaian memengaruhi proses perpindahan panas. Pada iklim dingin kita memakai pakaian tebal dan rapat agar panas tubuh tidak terbuang ke udara. Dalam keadaan kedinginan, tubuh akan bereaksi dengan cara menggigil. Sebenarnya, proses menggigil ini merupakan upaya tubuh untuk memperoleh panas secara mekanis (kontraksi otot). Sebaliknya di iklim panas, kita memakai pakaian yang tipis, ringan, dan terbuka agar panas tubuh tidak tertumbun dan segera bisa dibuang ke udara di sekitar kita. Jadi sebenarnya sungguh tidak masuk akal apabila kita di negara tropis ini memakai jas. Jas baik untuk dikenakan di daerah beriklim dingin, tetapi tidak tepat untuk dikenakan di daerah beriklim panas. Alasan bahwa jas adalah pakaian resmi internasional mestinya tidak begitu saja kita terima. Semestinya kita bisa mengembangkan pakaian resmi yang khas iklim tropis dan tetap percaya diri bersanding dengan jas hasil budaya barat.

***Tabel 1.5** Aktivitas dan kecepatan metabolisme*

	Aktivitas	Met	watt/m^2
1	Berbaring	0,8	46
2	Duduk tenang	1,0	58
3	Tukang jam	1,1	65
4	Berdiri santai	1,2	70
5	Aktivitas biasa (kantor, rumah tangga, sekolah, lab)	1,2	70
6	Menyetir mobil	1,4	80
7	Pekerja grafis – tukang jilid	1,5	85
8	Berdiri, aktivitas ringan (belanja, lab, industri ringan)	1,6	93
9	Guru, mengajar di depan kelas	1,6	95
10	Kerja rumah tangga (menyukur, mencuci, berpakaian)	1,7	100
11	Berjalan di dataran, 2 km/jam	1,9	110
12	Berdiri, aktivitas sedang (penjaga toko, rumah tangga)	2,0	116
13	Industri bangunan, memasang bata (bata 15,3 kg)	2,2	125
14	Berdiri mencuci piring	2,5	145
15	Kerja rumah tangga mengumpulkan daun di halaman	2,9	170

	Aktivitas	Met	watt/m^2
16	Kerja rumah tangga – mencuci dengan tangan dan menyeterika (120-220 W/m^2)	2,9	170
17	Besi dan baja – menuang, mencetak	3,0	175
18	Industri bangunan – membentuk cetakan	3,1	180
19	Berjalan di dataran, 5 km/jam	3,4	200
20	Kehutanan – memotong dengan gergaji satu tangan	3,5	205
21	Pertanian – membajak dengan kuda	4,0	235
22	Industri bangunan – mengisi pencampur semen dengan spesi dan batu	4,7	275
23	Olah raga – meluncur di atas es, 18 km/jam	6,2	360
24	Pertanian – menggali dengan cangkul (24 angkatan/menit)	6,5	380
25	Olah raga – ski di dataran 8 km/jam	7,0	405
26	Kehutanan – bekerja dengan kampak (2 kg, 33 ayunan/menit)	8,6	500
27	Olah raga – lari 15 km/jam	9,5	550

Sumber: www.innova.dk, orang dengan berat badan 70 kg kira-kira mempunyai kulit seluas 1,7m^2.

***Tabel 1.6** Pakaian dan clothing value*

Deskripsi			Clo	Resistan, m^{2}degC/W
1	Pakaian dalam, celana	Celana dalam pendek sekali	0,02	0,003
		Celana dalam pendek	0,03	0,005
		Celana dalam	0,04	0,006
		Celana kaki ½, wool	0,06	0,009
		Celana kaki panjang	0,10	0,016
2	Pakaian dalam, baju	Bra	0,01	0,002
		Baju tanpa lengan	0,06	0,009
		Oblong	0,09	0,014
		Baju lengan panjang	0,12	0,019
		Half-slip, nylon	0,14	0,022
3	Baju	*Tube top*	0,06	0,009
		Lengan pendek	0,09	0,029
		Blus ringan, lengan panjang	0,15	0,023
		Baju ringan, lengan panjang	0,20	0,031
		Baju normal, lengan panjang	0,25	0,039
		Baju flanel, lengan panjang	0,30	0,047
		Lengan panjang, blus kerah tinggi	0,34	0,053
4	Celana	Celana pendek	0,06	0,009
		Celana pendek selutut	0,11	0,017
		Celana panjang ringan	0,20	0,031
		Celana panjang normal	0,25	0,039
		Celana panjang flanel	0,28	0,043
		Celana terusan	0,28	0,043

Deskripsi			Clo	Resistan, m^{2}degC/W
5	Baju bengkel terusan	Harian, dengan sabuk	0,49	0,076
		Kerja	0,50	0,078
6	Baju bengkel dengan isolator panas	Terdiri atas beberapa komponen, berisi *Fibre-pelt*	1,03	0,160
			1,13	0,175
7	Sweater	Tanpa lengan	0,12	0,019
		Sweater tipis	0,20	0,031
		Lengan panjang, berkerah (tipis)	0,26	0,040
		Sweater	0,28	0,043
		Sweater tebal	0,35	0,054
		Lengan panjang, berkerah (tebal)	0,37	0,057

Sumber: www.innova.dk

Catatan: Untuk memperoleh nilai clo gabungan dapat dilakukan dengan menjumlahkan komponen pakaian.

1.4 Aspek Perancangan

Sub-bab ini akan memberikan pedoman tentang bangunan yang dapat membantu mencapai kenyamanan termal dari sisi ventilasi alami di iklim tropis lembab.

Bila memungkinkan, pilihlah lahan rumah yang ada di daerah berudara sejuk dan sehat. Ingat bahwa ventilasi alami sangat bergantung pada kualitas udara lingkungan sehingga udara lingkungan yang sejuk dan sehat menjadi modal utama keberhasilan ventilasi alami.

Usahakanlah tidak banyak permukaan di sekitar bangunan yang menyerap panas. Permukaan berwarna gelap akan menyerap radiasi panas matahari dan menjadi panas. Permukaan yang panas ini akan memanaskan udara yang bersentuhan dengannya. Udara yang menjadi panas dapat masuk ke dalam ruangan, mengakibatkan udara di dalam ruangan menjadi panas. Halaman yang tertutup rumput atau ternaungi oleh pohon akan lebih sejuk. Sebenarnya dedaunan juga akan menyerap radiasi panas, tetapi panas tadi dimanfaatkan untuk proses asimilasi, bukan menjadi panas yang berlebihan. Blok beton (*concrete block*) adalah penyerap panas yang akan menambah panas udara di sekitarnya. Oleh karena itu apabila penggunaan blok beton tidak dapat dihindari, misalnya untuk lewat kendaraan, pakailah blok beton yang berongga dan isilah rongga itu dengan rumput.

Tanaman rambat juga baik untuk menahan panas matahari mengenai dinding secara langsung. Daun tidak akan sepanas dinding bila terkena panas matahari yang panas, karena sebagian panas akan dipakai dalam proses evapotranspirasi dan fotosintesis. Selisih antara suhu daun dan permukaan lain dapat mencapai 30 derajat Celsius. Permukaan dinding yang dipenuhi daun dengan suhu rendah tentu akan memancarkan radiasi ke lingkungan lebih rendah pula. Jadi dapat membantu suhu lingkungan agar tetap sejuk. Selain itu daun membantu mengurangi gas CO_2 dan menambahkan O_2 pada lingkungan.

Sumbu panjang bangunan setidaknya sejajar dengan sumbu barat-timur. Ini akan meminimalkan permukaan bangunan yang terkena sinar matahari secara langsung. Bukaan menghadap ke selatan atau utara agar penetrasi sinar-matahari-langsung dapat diminimalkan. Secara teoretis ideal, untuk iklim tropis lembab di selatan katulistiwa, sumbu panjang bangunan bersudut 5^{o} dari sumbu timur-barat (arah jarum jam).

Bangunan sedapat mungkin berada di tengah lahan sehingga semua sisi terkena hembusan angin. Selain untuk kelancaran ventilasi, hembusan angin juga membantu menyejukkan permukaan bangunan.

Usahakan ventilasi dapat berlangsung 24 jam. Pada malam hari diperlukan kasa nyamuk untuk menghindari serangga yang tertarik pada sinar lampu masuk ke dalam ruangan. Jendela *krepyak* baik digunakan karena aliran udara dapat terjaga sementara privasi tidak terganggu. Hindari bangunan berdenah rumit. Partisi akan menghalangi kebebasan angin bergerak dalam ruangan. Contoh ekstrem adalah rumah tradisional Jawa, di mana satu bangunan (massa) hanya mempunyai satu ruangan.

Kelompokkanlah ruang-ruang yang berpotensi menambah beban panas dan kelembaban, seperti dapur dan kamar mandi. Hal ini akan melokalisasi sumber panas dan kelembaban. Pada ruang dengan fungsi-fungsi tersebut, pergantian udara harus sangat lancar. Pasanglah cerobong asap di atas kompor agar asap, udara panas, dan bau dapat keluar. Letak kompor jangan merapat pada dinding yang membatasi dapur dengan kamar tidur. Panas kompor akan menghangatkan dinding dan pada akhirnya panas akan dilepaskan di sisi kamar tidur. Kamar tidur akan menjadi gerah.

Setiap rumah tinggal seharusnya mempunyai minimal satu ruangan yang nyaman sehingga dapat digunakan untuk beristirahat total, terutama apabila sedang sakit. Bila dimungkinkan, ruang-ruang untuk bersantai dan

beristirahat, seperti ruang keluarga dan kamar tidur, diletakkan di daerah yang terlindung dari panas matahari sore hari. Oleh karena itu, sebaiknya ruang-ruang tersebut tidak diletakkan di sisi barat.

Beranda perlu diadakan untuk bersantai pada sore hari. Letakkanlah di sisi yang jauh dari kebisingan dan gangguan privasi. Beranda sebenarnya adalah ruang terbuka yang diatapi. Hubungan bebas dengan udara luar akan menjadikan beranda sebagai tempat yang nyaman pada saat udara di dalam bangunan gerah.

Bukaan diusahakan selebar-lebarnya untuk memberi keleluasaan angin bergerak di dalam ruang. Namun bukaan ini harus terlindung dari sinar-matahari-langsung yang akan memanaskan udara ruangan. Tritisan, pohon, dan tirai merupakan sarana yang baik untuk menghalangi sinar-matahari-langsung. Hati-hati dengan pemakaian tirai di sisi dalam kaca. Tirai yang panas akan berfungsi layaknya radiator yang akan melepaskan panasnya ke udara di dalam ruang. Untuk memperoleh efek tertentu (kesehatan, bersih, dan lain-lain), dapat saja sinar-matahari-langsung dimasukkan ke dalam bangunan, tetapi harus diingat bahwa hal ini akan menyebabkan ruangan menjadi panas. Di samping itu, sinar-matahari-langsung akan merusakkan/memudarkan warna perabotan dan lukisan. Lubang bukaan (jendela) sebaiknya tidak hanya satu dan harus diusahakan berada di bidang dinding yang berbeda sehingga tercipta ventilasi silang.

Dinding perlu terlindung dari sinar-matahari-langsung agar tidak panas. Dinding yang panas akan memindahkan panasnya ke udara di dalam ruangan. Oleh karena itu pakailah tritisan untuk melindungi dinding, terutama dinding sebelah barat. Pohon juga sangat baik untuk memberikan perlindungan alami. Di samping itu, dibanding pelindung yang rapat, dedaunan pohon yang bergerak-gerak memungkinkan sedikit demi sedikit sinar matahari menerobos dan menciptakan kesan dinamis dan artistik.

Langit-langit diperlukan untuk mencegah panas atap masuk ke dalam ruang di bawahnya, baik secara radiasi maupun konveksi. Ingat, atap yang panas akan memancarkan radiasi panas ke tubuh kita sehingga menyebabkan ketidak-nyamanan. Radiasi ini tidak dapat dicegah dengan hembusan aliran udara, tetapi dapat dicegah oleh langit-langit.

Volume ruangan dapat membantu mengusahakan kesejukan. Rumah-rumah kolonial di Indonesia memanfaatkan efek volume ini dengan membuat ruangan yang besar. Efek volume sebenarnya memanfaatkan prinsip

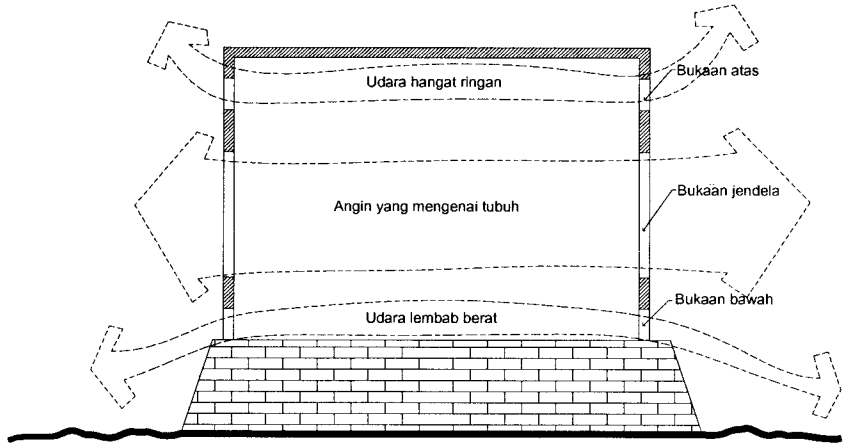
bahwa volume udara yang lebih besar akan menyebabkan panas lebih lama apabila dibandingkan dengan volume udara kecil. Pada malam hari, udara yang relatif lebih sejuk akan menyejukkan udara ruangan. Pada saat siang hari, udara sejuk ini dapat bertahan agak lama apabila tidak dipasok panas dari luar. Oleh karena itu efek volume akan bekerja dengan baik apabila dibarengi dengan penerapan penutup ruangan (atap, dinding) dari bahan-bahan yang menahan panas, serta jumlah penghuni ruang yang sedikit. Ruang bervolume besar kalau diisi banyak orang akan segera menjadi panas dan tidak nyaman karena setiap orang mengeluarkan panas.

Usahakanlah sumber panas dan kelembaban di dalam ruangan minimal. Pakailah peralatan yang tidak terlalu banyak mengeluarkan panas, misalnya monitor tabung (CRT, *cathode ray tube*) akan lebih banyak memancarkan panas daripada monitor LCD (*Liquid Crystal Display*). Bila tidak terpaksa, janganlah menyeterika dan memasak di dalam ruang tertutup. Panas dari seterika dan kelembaban (uap) dari proses memasak akan menambah panas dan lembab ruangan. Hal ini akan menyebabkan ruangan menjadi tidak nyaman. Lampu pijar mengeluarkan panas lebih banyak daripada lampu hemat energi walau dengan watt yang sama. Lampu LED (*light emmiting diode*) selain sangat hemat energi juga sangat sedikit memancarkan panas. Hindarilah kamar mandi yang langsung berhubungan dengan kamar tidur karena kelembaban dari kamar mandi akan dialirkan ke kamar tidur. Bila memungkinkan, berilah kipas penyedot udara yang akan membuang kelembaban (dan juga bau) kamar mandi keluar.

Usahakanlah ada tiga lubang pada dinding yang berbatasan dengan ruang luar (dinding eksterior), yaitu: lubang atas (ventilasi atas), lubang tengah (jendela) dan lubang bawah (ventilasi bawah). Lubang atas akan melepaskan udara panas yang biasa terjebak di atas, terutama apabila jendela tertutup. Lubang bawah untuk melepaskan udara lembab yang biasa terjebak di bagian bawah ruang. Lubang bawah saat ini tidak populer lagi, padahal bermanfaat untuk ventilasi. Bangunan-bangunan kolonial biasanya memiliki lubang bawah ini.

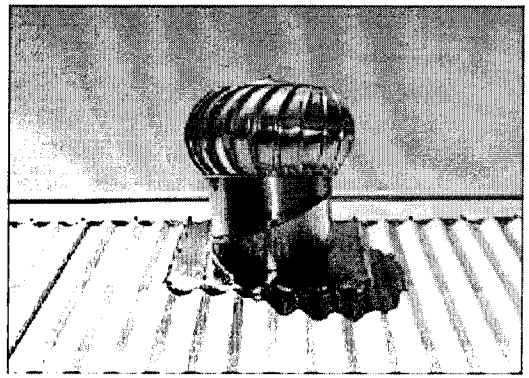
Angkatlah lantai minimal setinggi 50 cm dari halaman. Lantai bangunan yang lebih tinggi dari halaman luar akan memudahkan udara kotor dan lembab dari dalam bangunan mengalir keluar. Sebaliknya, udara kotor lembab yang berada di atas tanah atau halaman luar tidak gampang mengalir ke dalam bangunan. Ingat bahwa di atas lantai dan tanah, sekitar 5 cm, ada

iklim mikro yang lembab dan kotor. Iklim mikro ini menjadi tempat menyenangkan bagi serangga.



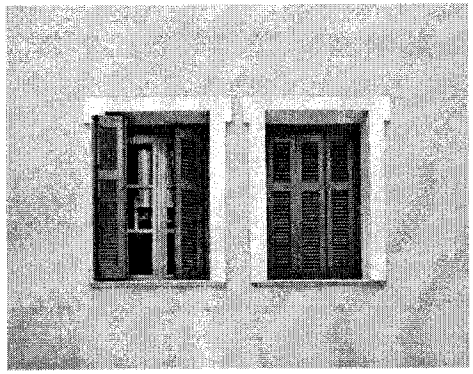
Gambar 1.8 *Saran zona bukaan pada bangunan*

Hindari pemakaian babut atau karpet plastik. Babut akan menjadi sarang debu dan kutu. Karpet plastik akan menjebak udara di antara karpet dan lantai. Bila lantai dingin, sebagian uap air yang dikandung oleh udara akan diembunkan dan menyebabkan lantai menjadi lembab. Bila hal ini berlangsung terus-menerus maka lantai akan berjamur dan rusak. Jamur ini akan menyebabkan ruangan menjadi berbau dan tidak sehat.



Gambar 1.9 *Roof ventilator bermanfaat untuk menghisap udara panas yang terkumpul di bawah atap secara lebih efisien (www.actionroofing.com.au)*

Usahakanlah bukaan ruang dibuka setiap hari, walau mungkin sebentar, agar terjadi pergantian udara. Di daerah tropis lembab, sering terjadi pengembunan di permukaan ruang yang dingin. Pengembunan (kondensasi) ini akan mengundang jamur, merusak permukaan (warna dan tekstur) dan melepaskan sporanya. Itulah mengapa ruangan yang tertutup agak lama akan berbau tidak enak. Bagi orang yang alergi, spora akan merangsang bersin.

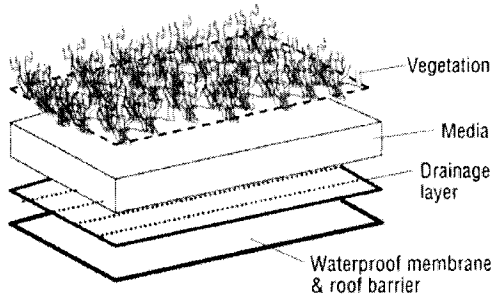


Gambar 1.10 *Jendela ganda yang cocok untuk daerah tropis. Di malam hari kaca dapat dibuka sedang jalusi ditutup sehingga ventilasi tetap berlangsung tanpa mengganggu privasi (www.pbase.com/armaco)*

Jika memungkinkan terapkanlah konsep atap hijau (*green roof, eco-roof*) yang akan menahan panas radiasi matahari masuk ke dalam ruangan dan juga membantu menjaga suhu lingkungan tidak terlalu tinggi (dibanding bila atap tanpa tanaman). Di Eropa dan Amerika pada umumnya atap dimaksudkan sebagai sarana mengatasi masalah pengaliran air hujan yang efektif. Atap hijau akan berlaku seperti sepon penghisap air pada saat hujan, mengikat polutan, melepaskan air kembali secara pelahan sehingga mengurangi efek erosi. Namun sebenarnya atap hijau memberi keuntungan lain, yaitu:

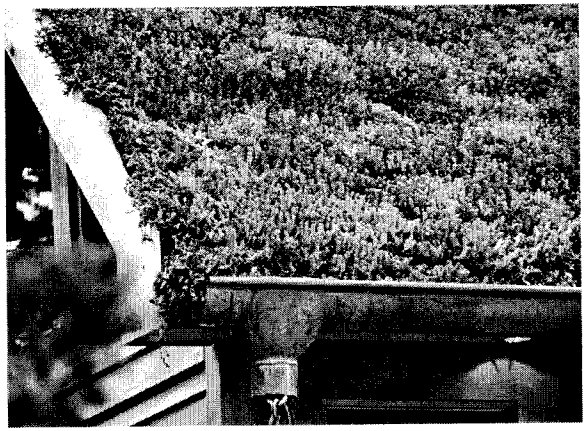
- Meningkatkan kualitas udara dan air (1 m^2 atap rumput dapat mengikat 0.2 kg partikel dari udara per tahun).
- Meningkatkan kualitas air. Menurut Environment Protection Agency (US), sistem akar pada atap hijau mengandung bakteri dan jamur yang berperan sebagai penyaring air alami melalui proses *bioremediation* dan *phytoremediation*.
- Mengurangi panas. Atap hijau tetap sejuk ketika terkena panas matahari. Ini akan mengurangi pemanasan lingkungan dan efek *urban heat island* di mana suhu kota bisa 5 derajat Celsius lebih tinggi daripada di luar kota yang penuh tanaman (Perry, 2003).

- Mengurangi biaya energi untuk pengondisian udara. Atap hijau menahan panas matahari masuk ke dalam ruangan sehingga mengurangi beban kerja AC. Jadi dapat mengurangi energi yang diperlukan oleh AC.
- Memperpanjang umur atap dua hingga tiga kali umur asli. Tanaman akan melindungi atap dari ungu-ultra dan panas matahari.
- Menyediakan tempat hidup bagi hewan liar seperti serangga (lebah, kupu-kupu) dan burung.



Gambar 1.11 *Profil umum sistem atap hijau ekstensif (tanaman tipis) (deNardo dalam Mather, 2006).*

Gambar 1.12 *Atap hijau dapat menjadi elemen arsitektural yang artistik sekaligus menghemat energi dan mengurangi panas lingkungan (www.djc.com; 8/6/6)*



Gambar 1.13 *Atap hijau tidak harus datar*

Di Indonesia penerapan atap hijau miring dan tebal tidak praktis dan mahal. Curah hujan yang lebat menyebabkan media tumbuh mudah tererosi. Penyerapan air akan menyebabkan atap menjadi amat berat sehingga struktur menjadi mahal (www.wildlife-gardening.org.uk; 8/6/6).

Gambar 1.14 *Dinding bertanaman rambat, menghalangi panas, membantu mengurangi polusi dan estetis, Government Headquarters, Hauts-de-Seine, France. Patric Blanc (Sumber: www.verticalgardenpatrickblanc.com; 20/11/08).*

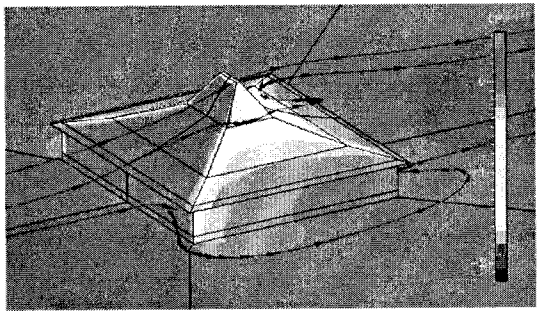
Gambar 1.15 *Atap berwarna putih akan memantulkan hingga 85% radiasi matahari*

Penerapan atap berwarna putih di iklim tropis lembab akan menimbulkan kesilauan yang tidak nyaman secara visual (karena langit sering tertutup awan putih merata yang menyilaukan, bukan warna biru.) Oleh karena itu atap hijau bertumbuhan adalah lebih baik dan tidak menyakitkan mata. Suhu maksimum harian rata-rata permukaan atap berwarna hitam dapat mencapai 76°C. Jika diganti warna putih akan turun hingga 52°C. Ini dapat menghemat 11% biaya mesin penyejuk udara (AC).

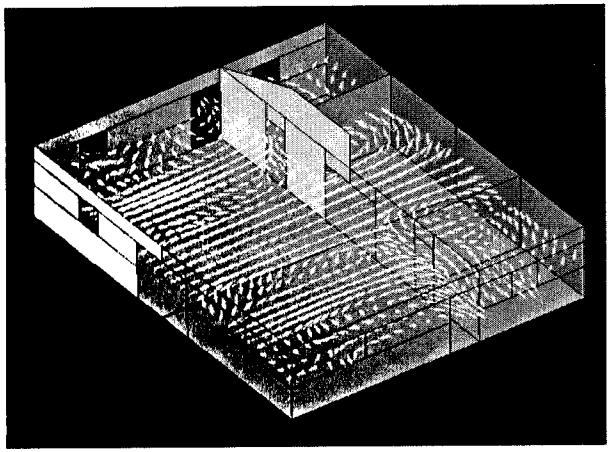
(http://www.everestcoatings.com/coolroof/coolroofstudy.htm; 29/11/2006)

1.5 Aspek Matematis

Sub bab ini memberikan rumus-rumus yang sering digunakan dalam perhitungan ventilasi. Rumus-rumus sederhana ini dapat digunakan sebagai pendekatan yang cukup baik. Untuk menghitung dan menyimulasi aliran udara secara akurat maka diperlukan perhitungan yang rumit yang hanya dapat dilakukan dengan bantuan komputer. Perangkat lunak yang populer untuk membantu perhitungan ini adalah program *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang harganya relatif mahal.



Gambar 1.16 *Studi terhadap aerodinamik Joglo menggunakan program CFD-ACE+ (Satwiko, 2004)*



Gambar 1.17 *Studi arah angin di dalam bangunan joglo dengan program CFD-ACE+ (Satwiko, 2004)*

1.5.1 Transmitan Elemen Bangunan Berlapis

$$\mathbf{U = 1/R_a} \quad \text{atau}$$

$$\mathbf{U = 1/(1/f_o + R_b + 1/f_i)\ W/m^2degC.}$$

dengan U = nilai transmitan (konduktan total), W/m^2degC.
f_o = konduktan permukaan luar bahan, W/m^2degC.
R_b = resistan total lapisan elemen, m^2degC/W.
f_i = konduktan permukaan dalam bahan, W/m^2degC.

Tabel 1.7 *Konduktan permukaan*

Letak Permukaan	Elemen	Konduktan, W/m^2degC
Pernukaan dalam, f_i	Dinding	8,12
	Lantai, langit-langit, panas mengalir ke atas	9,48
	Lantai, langit-langit, panas mengalir ke bawah	6,70
	Sisi bawah atap	9,48
Permukaan luar, f_o	Dinding selatan, terlindung	7,78
	Dinding selatan, normal	10,00
	Dinding selatan, sangat terbuka	13,18
	Dinding barat, barat daya dan tenggara, terlindung	10,00
	Dinding barat, barat daya dan tenggara, normal	13,18
	Dinding barat, barat daya dan tenggara, sangat terbuka	18,90
	Dinding barat laut, terlindung	13,18
	Dinding barat laut, normal	18,90
	Dinding barat laut, sangat terbuka	31,50
	Dinding utara, timurlaut, dan timur, terlindung	13,18
	Dinding utara, timurlaut, dan timur, normal	18,90
	Dinding utara, timurlaut, dan timur, sangat terbuka	81,20
	Atap, terlindung	14,20
	Atap, normal	22,70
	Atap, sangat terbuka	56,70

Sumber: Koenigsberger

Tabel 1.8 *Konduktivitas dan resistivitas beberapa bahan*

Bahan	Konduktivitas, k (W/mdegC)	Resistivitas, R (1/k) (W/mdegC)
Asbes: lepas-lepas	0,034	29,40
Asbes: disemprot	0,046	21,75
Lembaran semen asbes: ringan	0,216	4,63
Lembaran semen asbes: sedang	0,360	2,78
Lembaran semen asbes: padat	0,576	1,74
Aspal	0,576	1,74
Batubata biasa: ringan	0,806	1,24
Batubata biasa: sedang	1,210	0,83
Batubata biasa: padat	1,470	0,68
Plester	0,900	1,11
Glass wool	0,034	29,40
Mineral wool	0,037	27,00

Bahan	Konduktivitas, k (W/mdegC)	Resistivitas, R (1/k) (W/mdegC)
Papan gypsum	0,159	6,33
Plywood	0,138	7,25
Batu granit	2,920	0,34
Papan dari jerami	0,093	10,75
Softboard	0,065	15,38
Kayu: lunak	0,138	7,25
Kayu: keras	0,160	6,25
Logam: timah	34	0,0294
Logam: besi tuang	50	0,0200
Logam: baja	58	0,0172
Logam: perunggu	64	0,0156
Logam: seng	110	0,0091
Logam: aluminium	220	0,0045
Logam: tembaga	350	0,0029
Logam: perak	407	0,0024
Udara	0,026	38,45
Air	0,580	1,72

Tabel 1.9 *Transmitan konstruksi*

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Dinding	
Batubata, tidak diplester, tebal 114 mm	3,64
Batubata, diplester kedua sisinya, tebal 114 mm	3,24
Batubata, tidak diplester, tebal 228 mm	2,67
Batubata, diplester kedua sisinya, tebal 228 mm	2,44
Beton padat biasa, tebal 152 mm	3,58
Beton padat biasa, tebal 203 mm	3,18
Batu berkepadatan sedang, berpori, tebal 305 mm	2,84
Batu berkepadatan sedang, berpori, tebal 457 mm	2,27
Batubata berongga sejarak 280 mm, bagian luar bata fletton, bagian dalam bata biasa, dan sisi yang menghadap ruang dalam diplester	1,70
Batubata dengan isolator papan gabus setebal 25 mm, diplester	0,85
Batubata dengan isolator *fibreboard* setebal 13 mm, diplester	1,19
Batubata dengan isolator sleb serutan kayu setebal 50 mm, diplester	0,85
Batubata dengan bagian dalam diplester vermikulit setebal 16 mm.	1,47
Batubata, sisi dalam dilapis papan asbes 13 mm dengan rangka kayu	1,19
Batubata, sisi dalam dilapis papan serat 13 mm dengan rangka kayu	0,95
Batubata, sisi dalam dilapis papan jerami 50 mm dengan rangka kayu, diplester	0,74

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Batubata, sisi dalam dilapis *aerated concrete blocks* setebal 100 mm	1,13
Batubata, sisi dalam dilapis *clinker concrete blocks* setebal 100 mm	1,30
Aerated concrete block ganda (bercelah), tebal 250 mm (100+50+100), bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,19
Clinker concrete block ganda (bercelah), tebal 250 mm (100+50+100), bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,08
Aerated concrete block berongga, tebal 228 mm, satu lapis, bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,70
Clinker concrete block berongga, tebal 228 mm, satu lapis, bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,59
Asbes semen gelombang pada rangka	6,53
Asbes semen gelombang pada rangka baja dengan *fibreboard* 13 mm	2,04
Asbes semen gelombang pada rangka baja dengan lapisan jerami atau serutan kayu 50 mm	1,19
Asbes semen gelombang pada rangka baja dengan *aerated concrete block* 76 mm	2,10
Atap Miring	
Asbes semen gelombang	7,95
Asbes semen gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm. (asbes semen diletakkan pada gording, sedangkan *fibreboard* ditempelkan bagian bawah rangka)	1,70
Asbes semen gelombang dilapis dengan *fibreglass* setebal 25 mm.	0,80
Asbes semen gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm yang dipasang pada rangka kayu. Di atas *fibreboard* ditempelkan aluminium foil.	1,20
Asbes semen gelombang, langit-langit dari papan kayu setebal 13 mm yang dipasang pada rangka kayu. Di atas papan kayu ditempelkan aluminium foil.	1,60
Asbes semen gelombang, langit-langit dari asbes semen setebal 5 mm yang dipasang pada rangka kayu. Di atas asbes semen ditempelkan aluminium foil.	1,70
Asbes semen gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm, di atas *fibreboard* diberi *fibreglass* 25 mm, dan di atas *fibreglass* ditempel *alumunium foil.*	0,68
Asbes semen gelombang, langit-langit dari papan kayu setebal 13 mm, di atas papan kayu diberi *fibreglass* 25 mm, dan di atas *fibreglass* ditempel *alumunium foil.*	0,74
Asbes semen gelombang, langit-langit dari asbes semen setebal 5 mm, di atas asbes semen diberi *fibreglass* 25 mm, dan di atas *fibreglass* ditempel *alumunium foil.*	0,80
Aluminium gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm.	1,30
Aluminium gelombang, langit langit dari asbes semen setebal 5 mm.	1,90

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Aluminium gelombang, langit-langit dari papan jerami setebal 50 mm.	1,08
Aluminium gelombang, langit-langit dari sleb serutan kayu setebal 25 mm.	1,42
Aluminium gelombang, langit-langit dari papan gipsum 10 mm.	1,88
Aluminium gelombang, langit-langit dari sleb gabus setebal 25 mm.	1,27
Asbes gelombang dengan lapisan papan kayu setebal 13 mm.	2,16
Asbes gelombang dengan lapisan jerami atau serutan kayu setebal 50 mm.	1,25
Asbes gelombang dengan lapisan kapas setebal 25 mm pada papan setebal 13 mm.	0,85
Baja lapis seng gelombang pada rangka kayu.	8,52
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit *fibreboard* 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar.	1,30
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit papan kayu 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar.	1,60
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit asbes semen 5 mm yang dipasang pada ikatan mendatar.	1,90
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit *fibreboard* 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar. Di atas *fribreboard* ditempelkan *aluminium foil.*	1,00
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit papan kayu 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar. Di atas papan kayu ditempelkan *aluminium foil.*	1,30
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit asbes semen 5 mm yang dipasang pada ikatan mendatar. Di atas asbes semen ditempelkan *aluminium foil.*	1,40
Genteng tanah liat dengan langit-langit *fibreboard* 13 mm yang di atasnya dilapis *fibreglass* 25 mm. Di atas *fibreglass* ditempelkan *aluminium foil.*	0,62
Genteng tanah liat dengan langit-langit papan kayu 13 mm yang di atasnya dilapis *fibreglass* 25 mm. Di atas papan kayu ditempelkan *aluminium foil.*	0,74
Genteng tanah liat dengan langit-langit asbes semen 5 mm yang di atasnya dilapis *fibreglass* 25 mm. Di atas asbes semen ditempelkan *aluminium foil.*	0,80
Seng gelombang pada rangka kayu ditambah langit-langit gipsum.	3,18
Genteng atau lempengan batu pada papan ditambah lapisan bulu kempa dan langit-langit gipsum.	1,70
Dek aluminium, *fibreboard* 13 mm dengan dua lapis bulu kempa bitumen.	2,16
Dek aluminium, lapisan jerami atau serutan kayu setebal 50 mm.	1,25

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Atap Datar	
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, di atas *screed* ditambah tiga lapis bulu kempa bitumen	3,35
Beton bertulang setebal 100 mm, di atasnya *screed* setebal 75 mm. Langit-langit dari *fibreboard* 13 mm yang ditempelkan pada rangka kayu di bawah beton.	1,30
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, ditambah lagi isolator dari gabus setebal 25 mm, plus tiga lapis bulu kempa bitumen	1,08
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, ditambah lapisan jerami atau serutan kayu sebagai isolator setebal 50 mm, plus tiga lapis bulu kempa bitumen	1,13
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, ditambah dua *fibreboard* masing-masing 12 mm sebagai isolator, plus tiga lapis bulu kempa bitumen.	1,25
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum	1,82
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum, di atas papan dilapisi isolator gabus setebal 25 mm.	0,85
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum, di atas papan dilapisi isolator *fibreboard* setebal 13 mm.	1,25
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum, di atas papan dilapisi isolator jerami atau serutan kayu setebal 50 mm.	0,91
Lantai	
Beton di atas tanah atau lapisan padat.	1,13
Beton di atas tanah atau lapisan padat, plus granit, teraso atau kepingan lain.	1,13
Beton di atas tanah atau lapisan padat, plus blok kayu.	0,85
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai berventilasi.	1,70
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi dari satu sisi, di atas papan di lapis parket, lino, atau karet.	1,42
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi.	2,27
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di atas papan di lapis parket, lino, atau karet.	1,98
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, bagian bawah papan dilapis *fibreboard* 25 mm.	1,08

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, bagian bawah papan dilapis papan gabus 25 mm.	0,95
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di bawah balok kayu dipasang papan gabus 25 mm.	0,79
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di bawah balok kayu dipasang papan jerami 50 mm.	0,85
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di bawah digantungkan *aluminium foil* dua sisi.	1,42

***Tabel 1.10** Bahan atap dan kenaikan suhu*

Material	Kenaikan suhu atap dibandingkan dengan suhu udara lingkungan (°C, tanpa angin, matahari terik)	Keterangan
Berwarna putih cerah dan halus	8	Merupakan bahan yang paling sejuk.
Berwarna putih dan kasar	19	Semakin kasar akan semakin hangat
Berwarna sangat muda (pastel)	8 – 30	
Berwarna terang (merah, hijau, biru, dll.)	43 - 46	
Aluminium berlapis aspal	28 – 36	Aluminium cerah tanpa lapisan aspal paling sejuk
Berlapis kerikil	15 – 46	Warna kerikil semakin cerah semakin sejuk
Lembaran aspal berpasir	40 – 50	Warna cerah akan sedikit lebih sejuk. Aspal cenderung panas walau berwarna cerah.
Berwarna hitam	50	
Abu-abu medium	29	Koefisien refleksi di antara putih dan hitam

1.5.2 Panas yang Menembus Elemen Bangunan

$$Q_c = A.U.\Delta T.$$

dengan A = luas elemen, m^2.
U = nilai transmitan, W/m^2degC.
ΔT = selisih suhu permukaan luar dan dalam, degC.

1.5.3 Panas yang Menembus Kaca

$$Q_s = A.I.\theta\ W.$$

A = luas jendela, m^2.
I = intensitas radiasi matahari, W/m^2.
θ = *solar gain factor* bahan kaca

Solar gain factor (θ) dapat diperoleh dari pabrik pembuat kaca. Dalam hal data θ belum memasukkan pertimbangan sudut datang sinar-matahari-langsung pada bidang kaca, maka $I = I\cos\beta$. β adalah sudut yang dibentuk oleh garis datang sinar matahari dengan garis normal (tegak lurus) bidang.

1.5.4 Kenaikan Suhu Benda oleh Radiasi Matahari

$$T_s = T_o + (I.\alpha_{total}/f_o)\ ^oC.$$

T_s = suhu permukaan yang terkena sinar-matahari-langsung, °C.
T_o = suhu ruang luar, °C.
I = intensitas radiasi matahari, W/m^2.
α_{total} = bilangan serap rata-rata antara permukaan (α_w) dan material (α_p), $\alpha_{total} = (\alpha_w + \alpha_p)/2$
f_o = konduktan permukaan yang terkena radiasi matahari, W/m^2degC.

***Tabel 1.11** Bilangan serap*

Bahan Dinding Luar	α_w	Cat Dinding Luar	α_p
Beton berat (untuk bangunan nuklir)	0,91	Hitam merata	0,95
Bata merah	0,89	Pernis hitam	0,92
Bitumen lembaran	0,88	Abu-abu tua	0,91
Batu sabak	0,87	Pernis biru tua	0,91
Beton ringan	0,86	Cat minyak hitam	0,90
Aspal jalan setapak	0,82	Coklat tua	0,88
Kayu permukaan halus	0,78	Abu-abu biru tua	0,88
Beton ekspos	0,61	Biru/hijau tua	0,88
Ubin putih	0,58	Coklat medium	0,84
Bata kuning tua	0,56	Pernis hijau	0,79
Atap putih	0,50	Hijau medium	0,59
Cat aluminium	0,40	Kuning medium	0,58
Kerikil	0,29	Hijau/biru medium	0,57

Bahan Dinding Luar	α_w	Cat Dinding Luar	α_p
Seng putih	0,26	Hijau muda	0,47
Bata glasir putih	0,25	Putih agak mengilap	0,30
Almunium lembaran mengilap	0,12	Putih mengilap	0,25
		Perak	0,25
		Pernis putih	0,21

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum.

1.5.5 Kecepatan Angin di Ketinggian Tertentu, m/dtk

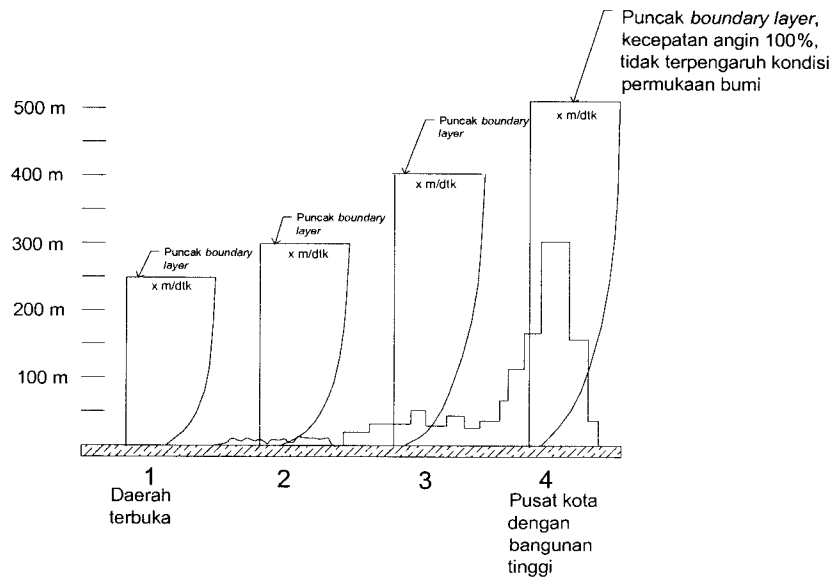
$$V_h = V_{bl}(h/h_{bl})^{\varphi} \text{ m/dtk.}$$

dengan V_h = kecepatan angin di ketinggian h, m/dtk.
V_{bl} = kecepatan angin di puncak *boundary layer*, m/dtk.
h = ketinggian ukur, m.
h_{bl} = ketinggian *boundary layer*, m.
φ = eksponen kecepatan angin rata-rata

Tabel 1.12 *Boundary layer (Aynsley, 1979)*[4]

Kategori permukaan tanah	Deskripsi permukaan tanah	Ketinggian boundary layer, m	Eksponen kecepatan angin rata-rata (φ)
1	Laut terbuka, padang es, padang pasir	250	0,11
2	Daerah terbuka dengan perdu pendek dan pepohonan jarang	300	0,15
3	Daerah pinggiran kota, kota kecil, hutan	400	0,25
4	Pusat kota dengan bangunan tinggi, daerah perindustrian	500	0,36

[4] Variasi eksponen dapat ditemui di beragam buku yang lebih baru seperti (Etheridge, 1996; Awbi, 1991; Brown, 2004).



Gambar 1.18 *Lapisan batas di kondisi permukaan bumi yang berbeda*

1.6 Aliran Udara Karena Perbedaan Tekanan Angin, Q_p (p = *pressure*)

$$Q_p = C_v A V \text{ m}^3/\text{dtk.}$$

dengan Q_p = udara yang mengalir melalui jendela, m^3/dtk.
C_v = keefektifan bukaan (0,5 – 0,60 apabila arah datang angin tegak lurus bukaan, 0,25 – 0,35 apabila arah angin diagonal jendela)
A = luasan efektif jendela (bukaan), m^2.
V = kecepatan angin, m/dtk.

Rumus di atas digunakan untuk kondisi lubang masuk (*inlet*) dan keluar (*outlet*) sama luasnya. Bila lubang masuk dan keluar tidak sama, maka C_v perlu dikalikan dengan konstanta proporsional seperti dalam tabel di bawah ini.

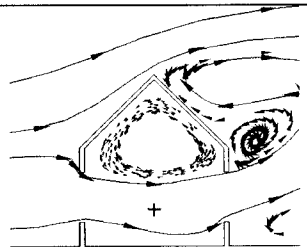
Tabel 1.13 Konstanta penyesuaian proporsi bukaan akibat tekanan angin

Perbandingan luas inlet dan outlet	Pengali C_v	Perbandingan luas inlet dan outlet	Pengali C_v
1:1	1,00	1:5	1,40
1:2	1,27	2:1	0,63
1:3	1,35	4:1	0,35
1:4	1,38	4:3	0,86

Sumber: Boutet, 1987

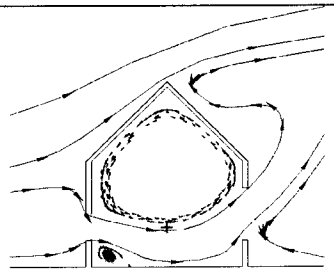
Inlet = Outlet

V_P = 0,48 m/dtk
T_P = 21,7 °C
Angin berputar di bawah atap yang dapat membawa panas dari sisi bawah atap, berada di atas zona hunian.



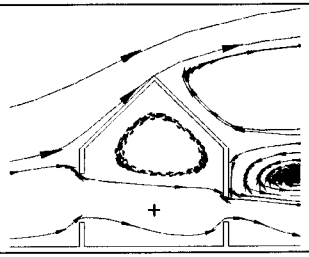
Inlet < Outlet

V_P = 0,36 m/dtk
T_P = 22,3 °C
Angin berputar di bawah atap mencapai ketinggian kepala penghuni yang dapat menyebabkan penghuni merasa hangat di kepala.



Inlet > Outlet

V_P = 0,29 m/dtk
T_P = 22,2 °C



***Gambar 1.19** Simulasi dengan program CFD menunjukkan pengaruh konfigurasi dimensi inlet dan outlet pada kecepatan angin di dalam ruang (Lam, Satwiko, 2006)*

1.6.1 Aliran Udara untuk Membuang Panas, Q, Tanpa Memperhatikan Volume Ruang

$$\mathbf{Q = H/60C_p\rho(t_i\text{-}t_o)\ m^3/dtk.}$$

dengan Q = udara yang dipindahkan, m^3/dtk.
H = panas yang dipindahkan, W, (W=J/dtk)
C_p = panas jenis udara pada tekanan konstan, 1025 J/kg°C.
ρ = berat jenis udara, 1,2 kg/m^3.
t_i = suhu udara di dalam ruangan, °C.
t_o = suhu udara di luar ruangan, °C.

1.6.2 Aliran Udara untuk Membuang Panas, Q, dengan Memperhatikan Volume Ruang

$$\mathbf{Q = VN/3600\ m^3/dtk.}$$

dengan Q = udara yang dipindahkan, m^3/dtk.
N = pergantian udara ruang per jam; N=H/0,33V(t_i-t_o)
V = volume ruang, m^3.
H = panas yang dipindahkan, W, (W = J/dtk).
t_i = suhu udara di dalam ruangan, °C.
t_o = suhu udara di luar ruangan, °C.

1.6.3 Aliran Udara Karena Perbedaan Suhu Udara, Q_B (B = *buoyancy*, daya apung)

$$\mathbf{Q_B = CAh(t_i - t_o)\ m^3/dtk.}$$

dengan Q_B = udara yang mengalir melalui bukaan, m^3/dtk
C = konstanta proporsi, 0,121
A = luas bebas bukaan, m^2 (pakai luasan yang kecil)
h = tinggi antara titik tengah bukaan bawah (*inlet*) dan titik tengah bukaan atas (*outlet*), m.
t_i = suhu udara rata-rata di dalam ruangan, °C.
t_o = suhu udara di luar ruangan, °C.

Bila luas inlet dan outlet tidak sama, maka C perlu disesuaikan seperti tabel berikut ini.

MILIK

Tabel 1.14 Konstanta penyesuaian proporsi bukaan akibat gaya apung

Perbandingan luas inlet dan outlet	Pengali C	Perbandingan luas inlet dan outlet	Pengali C
1:1	1,00	1:5	1,40
1:2	1,27	2:1	0,63
1:3	1,35	4:1	0,35
1:4	1,38	4:3	0,86

Sumber: Boutet, 1987.

1.6.4 Aliran Udara yang Diakibatkan Oleh Gabungan Tekanan Angin dan Perbedaan Suhu

$$Q = [Q_P^2 + Q_B^2]^{0,5}$$

dengan Q_P = aliran angin oleh perbedaan tekanan, m^3/dtk.
Q_B = aliran angin oleh perbedaan suhu, m^3/dtk.

1.6.5 Indeks Kenyamanan Termal Menurut PMV dan PPD

Profesor P. O. Fanger telah membuat skala dan rumus untuk menilai tingkat kenyamanan ruang. Dia membuat skala PMV (*Predicted Mean Vote*) dan PPD (*Predicted Percentaged of Dissatisfied*). Skala PMV terdiri atas 7 titik: -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3 yang mewakili kondisi dingin, sejuk, agak sejuk, netral, agak hangat, hangat dan panas. Sedangkan PPD memberikan prakiraan berapa besar (%) penghuni ruang yang akan merasa tidak nyaman. Jelas bahwa apabila PPD semakin mendekati 0% berarti ruang semakin nyaman.

$$PMV = (0,303.e^{-0.036M} + 0,028)[(M-W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]$$

$$H = \varepsilon\sigma(A_r/A_{Du})f_{cl}[(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] + f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)$$

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl}k_1 f_{cl}[(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] - I_{cl}f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)$$

$$k_1 = \varepsilon\sigma(A_r/A_{Du}) = 39,6.10^{-9}$$

$h_c = 2,38.(t_{cl}-t_a)^{0,25}$ atau $12,1.(V_{ar})^{0,5}$ dipilih yang lebih besar

$f_{cl} = 1,00 + 1,29.I_{cl}$ apabila $I_{cl} < 0,078$ $m^{2o}C/W$ atau
$1,05 + 0,645.I_{cl}$ apabila $I_{cl} \geq 0,078$ $m^{2o}C/W$

$t_{sk} = 35,7 - 0,028.(M-W)$

$$E_c = 3,05.10^{-3}.[5733 - 6,99.(M-W) - p_a] + 0,42.(M-W-58,15)$$

$$C_{res} = 0,0014.M.(34 - t_a)$$

$$E_{res} = 1,72.10^{-5}.M.(5867 - p_a)$$

$$PPD = 100 - 95.e^{(0,03353.PMV^4 + 0,2179.PMV^2)}$$

dengan,

M = Kecepatan metabolisme, W/m^2.
W = Tenaga mekanis efektif, W/m^2.
p_a = Kelembaban, tekanan parsial uap air, Pa.
t_a = Temperatur udara, °C.
t_r = Temperatur permukaan rata-rata, °C.
f_{cl} = Faktor area pakaian. Perbandingan antara permukaan tubuh yang tertutup pakaian dan yang terbuka.
V_{ar} = Kecepatan angin relatif. Kecepatan angin relatif yang mengenai tubuh, termasuk jika tubuh bergerak, m/dtk.
t_{cl} = Temperatur permukaan pakaian, °C.
I_{cl} = Isolator pakaian, $m^{2o}C/W$.
E_C = Pertukaran panas secara penguapan pada kulit ketika manusia mengalami sensasi netral, W/m^2.
C_{res} = Pertukaran panas konvektif respiratori, W/m^2.
E_{res} = Pertukaran panas evaporatif respiratori, W/m^2.
T_{sk} = Temperatur kulit, °C.
H = Kehilangan panas kering. Kehilangan panas melalui kulit akibat konveksi, radiasi dan konduksi.
PMV = *Predicted Mean Vote*
PPD = *Predicted Percentage of Dissatisfied*

1.6.6 Tabel Mahoney

Tabel Mahoney terdiri atas beberapa tabel yang digunakan untuk menemukan hubungan antara kondisi iklim dan perancangan bangunan. Tabel ini memberikan rekomendasi perancangan bangunan secara umum.

Tabel A1
Data lokasi

Lokasi	
Garis Bujur	
Garis Lintang	
Ketinggian	

Tabel A2
Temperatur udara, °C

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Tinggi	TRT
Maksimum rata-rata bulanan														
Minimum rata-rata bulanan														
Rentang rata-rata bulanan													Rendah	RRT

TRT = Temperatur rata-rata tahunan
RRT = Rentang rata-rata tahunan

Tabel A3
Kelembaban udara, %

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Maksimum rata-rata bulanan, a.m.												
Minimum rata-rata bulanan, p.m.												
Rata-rata												
Kelompok kelembaban												

Tabel A4
Kelompok kelembaban

Kelompok kelembaban	Jika rata-rata RH:
1	Di bawah 30%
2	30-50%
3	50-70%
4	Di atas 70%

Tabel A5
Curah hujan dan angin

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Curah hujan, mm													

Arah angin utama												
Arah angin sekunder												

Tabel A6
Batas kenyamanan

Kelompok kelembaban	TRT di atas 20°C		TRT 15-20°C		TRT di bawah 15°C	
	Siang	Malam	Siang	Malam	Siang	Malam
1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18

Tabel B1
Diagnosis

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TRT
Maksimum rata-rata bulanan													
Kenyamanan siang: Atas													
Kenyamanan siang: bawah													
Minimum rata-rata bulanan													
Kenyamanan malam: atas													
Kenyamanan malam: bawah													
Tegangan termal: siang													
Tegangan termal: malam													

P (Panas) apabila temperatur rata-rata di atas batas
N (Nyaman) apabila temperatur rata-rata di dalam batas
D (Dingin) apabila temperatur rata-rata di bawah batas

Tabel B2
Indikator

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Lembab: L1													
L2													
L3													
Kering: K1													
K2													
K3													

L Lembab
K Kering

Tabel B3

Arti	Indikator	Tegangan panas		Curah hujan	Kelompok kelembaban	Rentang rata-rata temperatur bulanan
		Siang	Malam			
Pergerakan udara sangat diperlukan	L1	P			4	
		P			2, 3	Kurang dari 10°C
Pergerakan udara diinginkan	L2	N			4	
Perlindungan terhadap hujan diperlukan	L3			Di atas 200 mm		
Kapasitas panas diperlukan	K1				1, 2, 3	Lebih dari 10°C
Tidur di ruang terbuka diinginkan	K2		P		1, 2	
		P	N		1, 2	Lebih dari 10°C
Perlindungan terhadap dingin	K3	D				

Tabel C
Spesifikasi yang disarankan

Total indikator dari Tabel B					
L1	L2	L3	K1	K2	K3

Layout

			0-10					
			11, 12		5-12		1	Orientasi ke utara dan selatan (sumbu panjang timur-barat)
					0-4		2	Rancangan bangunan kompak dengan halaman di tengah

Peruangan

11, 12							3	Peruangan terbuka untuk penetrasi hembusan angin
2-10							4	Seperti 3, tetapi diberi perlindungan terhadap angin panas dan dingin
0, 1							5	Susunan kompak

Pergerakan angin

3-12							6	Bangunan mempunyai ruang tunggal, tidak bersekat-sekat, penyediaan pergerakan angin permanen
1, 2			0-5					
			6-12				7	Bangunan mempunyai ruang ganda, penyediaan pergerakan angin temporer
0	2-12							
	0, 1						8	Tidak diperlukan pergerakan angin

Bukaan

			0, 1		0		9	Bukaan luas, 40-80%
			11, 12		0, 1		10	Bukaan sangat kecil, 10-20%
Kondisi lain							11	Bukaan sedang, 20-40%

Dinding

			0-2				12	Dinding ringan, waktu perambatan panas pendek
			3-12				13	Dinding luar dan dalam berat

Atap

			0-5				14	Atap ringan, berisolator
			6-12				15	Atap berat, waktu perambatan panas lebih dari 8 jam

Tidur di luar

				2-12			16	Diperlukan ruangan untuk tidur di luar

Perlindungan terhadap hujan

		3-12					17	Diperlukan perlindungan terhadap curah hujan lebat

Tabel D
Saran untuk detail

Total indikator dari Tabel B					
L1	L2	L3	K1	K2	K3

Ukuran bukaan

			0, 1		0		1	Besar: 40-80%
					1-12		2	Sedang: 25-40%
			2-5				3	Kecil: 15-25%
			6-10				4	Sangat kecil: 10-20%
			11,12		0-3		5	Sedang: 25-40%
					4-12			

Letak bukaan

3-12							6	Di sebelah utara dan selatan, setinggi tubuh manusia, pada sisi datangnya angin
1-2			0-5					
			6-12				7	Seperti di atas, bukaan juga diterapkan pada dinding dalam
0	2-12							

Perlindungan bukaan

						0-2	8	Hindari sinar-matahari-langsung
		2-12					9	Lindungi dari curah hujan

Dinding dan lantai

			0-2				10	Ringan, kapasitas panas rendah
			3-12				11	Berat, perambatan panas lebih dari 8 jam

Atap

10-12			0-2				12	Ringan, permukaan mengilap, berongga
			3-12				13	Ringan, diberi isolator panas
0-9			0-5					
			6-12				14	Berat, perambatan panas lebih dari 8 jam

Fitur luar

					1-12		15	Ruang untuk tidur di luar
		1-12					16	Drainase hujan cukup

1.6.7 Perbedaan Suhu Kawasan Berbangunan dan Tak Berbangunan

Oke (1981) membuat rumus untuk menghitung perbedaan suhu lingkungan antara kawasan yang berbangunan dengan bila kawasan tersebut tidak berbangunan:

$$\Delta T_{max} = 7.45 + 3.97 * \ln(H/D)$$

dengan ΔT_{max} = perbedaan suhu maksimum, degC
H = ketinggian rata-rata bangunan, m
D = jarak rata-rata antar bangunan, m

1.6.8 Suhu Perkotaan Akibat Populasi

Oke (1982) juga membuat rumus yang menghubungkan populasi perkotaan dengan suhu, yaitu sebagai berikut:

$$\Delta T = P^{0.25} / (4*V)^{0.5}$$

dengan ΔT = intensitas *urban heat island*, degC (perbedaan maksimum antara suhu perkotaan dan pedesaan)
P = populasi
V = kecepatan angin regional, m/s

Dari kedua rumus tersebut dapat diasumsikan bahwa kondisi lebih jelek akan terjadi bila H/D dan P lebih besar dan V lebih kecil. Salah satu contoh H/D besar adalah perkotaan padat dengan bangunan berlantai banyak dan jalan-jalan sempit di antaranya. Populasi besar berarti aktivitas lebih banyak dan produksi panas lebih banyak pula. Kecepatan angin yang rendah akan menyebabkan panas tidak dapat pergi sehingga terjadi konsentrasi panas di lokasi tersebut. Dengan demikian, menurut kedua rumus tadi, kenaikan suhu kawasan di masa depan dapat dihambat dengan cara:

- Membatasi kepadatan bangunan dan ketinggiannya (komposisi tinggi bangunan dan jarak antarbangunan); mengingat konsep tumbuh cepat, ini berarti harus ada penerapan peraturan Koefisien Dasar Bangunan (KDB) dan Koefisien Lantai Bangunan (KLB) yang realistis, yang tidak sekedar memenuhi rasio lantai dasar bangunan - ruang terbuka dan rasio luas lantai–lantai dasar saja, tetapi yang terlebih penting adalah mengusahakan terwujudnya cita-cita konservasi yang melatarbelakangi konsep KDB dan KLB tadi. Konfigurasi bangunan harus menjamin lancarnya hembusan angin.
- Membatasi kepadatan populasi; ini dapat bertentangan dengan semangat tumbuh cepat kawasan yang secara alamiah tentu mendorong pertambahan kepadatan penduduk.

1.7 Contoh-contoh Perhitungan

Sub-bab ini akan memberikan contoh pemakaian rumus secara sederhana.

1.7.1 Menghitung Transmitan Elemen Bangunan

Soal:

Elemen dinding terdiri atas lapisan plester luar (1,5 cm), batu bata (12 cm), dan plester dalam (1,5 cm). Konduktivitas plaster = 0,9 Wm/m^{2}degC, sedang konduktivitas batu bata 1,2 Wm/m^{2}degC.

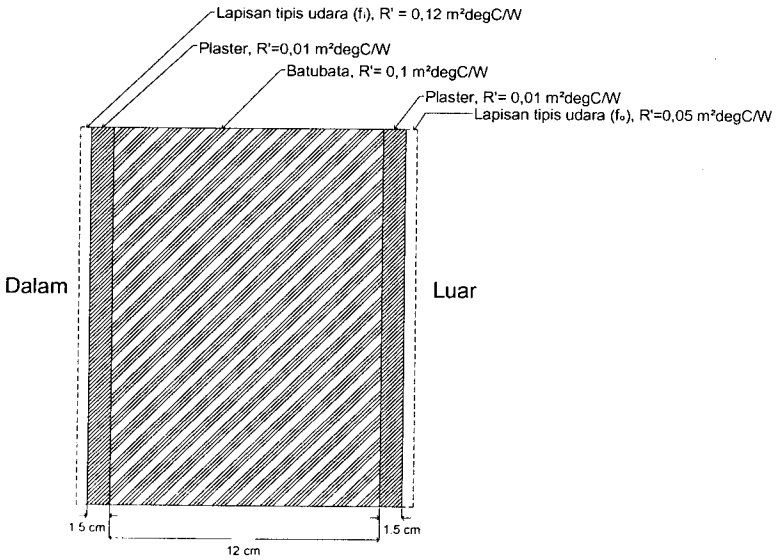
1. Hitunglah transmitan dinding!
2. Hitunglah transmitan dinding apabila permukaan sebelah dalam dilapisi kayu 2 cm dengan konduktivitas = 0,16 Wm/m^{2}degC!

Jawaban soal 1:

Ingat bahwa konduktivitas adalah untuk tebal 1 m, sedang konduktan untuk tebal nyata!

Konduktivitas plester ($k_{plester}$) = 0,9 Wm/m^{2}degC → konduktan plaster ($k'_{plester}$) = 0,9/0,015 W/m^{2}degC = 60 W/m^{2}degC. Resistan plester ($R'_{plaster}$) = $1/k'_{plaster}$ = 1/60 = 0,017 m^{2}degC/W.

Konduktivitas batu bata ($k_{batu\ bata}$) = 1,2 Wm/m^{2}degC → konduktan batu bata ($k'_{batu\ bata}$) = 1,2/0,12 W/m^{2}degC = 10 W/m^{2}degC. Resistan batu bata ($R'_{batu\ bata}$) = $1/k'_{batu\ bata}$ = 1/10 m^{2}degC/W = 0,1 m^{2}degC/W.



***Gambar 1.20** Transmisi dinding tanpa lapisan kayu*

Konduktan permukaan dalam dinding (f_i) = 8,12 W/m^{2}degC. Konduktan permukaan luar dinding (f_o) menghadap ke timur, kondisi normal 18,9 W/m^{2}degC. Lihat ***Tabel 1.7***.

Resistan dinding ($R'_{dinding}$)

$= 1/f_i + R'_{plester\ dalam} + R'_{batu\ bata} + R'_{plester\ luar} + 1/f_o\ m^2degC/W.$

$= 1/8,12 + 0,017 + 0,1 + 0,017 + 1/18,9\ m^2degC/W.$

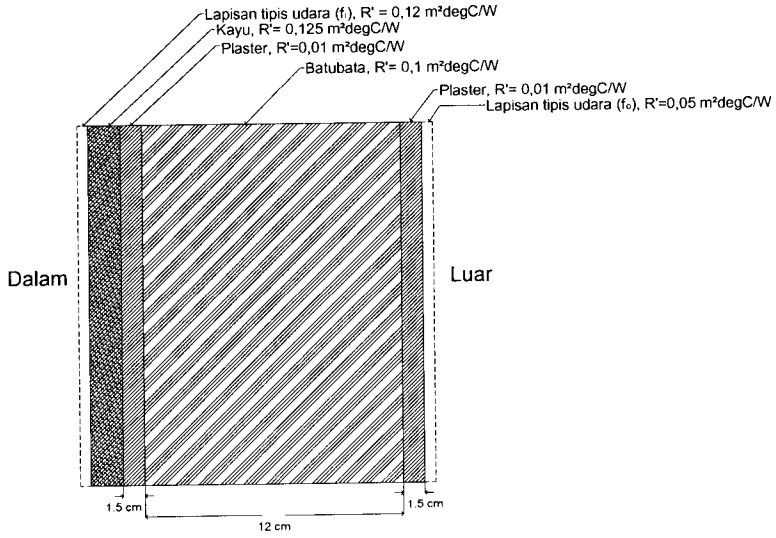
$= 0,12 + 0,017 + 0,1 + 0,017 + 0,05\ m^2degC/W.$

$= 0,304\ m^2degC/W.$

Transmitan dinding ($U'_{dinding}$) = $1/R'_{dinding}$ = $1/0,304\ W/m^2degC$ = **3,29 W/m²degC**.

Jawaban soal 2:

Konduktivitas kayu (k_{kayu}) = $0,16\ Wm/m^2degC$ → konduktan kayu (k'_{kayu}) = $0,16/0,02\ W/m^2degC = 8\ W/m^2degC$. $R'_{kayu} = 0,125\ m^2degC/W$.



***Gambar 1.21** Transmisi dinding yang sebelah dalam dilapisi kayu*

Resistan dinding ($R'_{dinding}$)

$= 1/f_i + R'_{kayu} + R'_{plester\ dalam} + R'_{batu\ bata} + R'_{plester\ luar} + 1/f_o\ m^2degC/W.$

$= 1/8,12 + 0,125 + 0,017 + 0,1 + 0,017 + 1/18,9\ m^2degC/W.$

$= 0,12 + 0,125 + 0,017 + 0,1 + 0,017 + 0,05\ m^2degC/W.$

$0,429\ W/m^2degC.$

Transmitan dinding ($U'_{dinding}$) = $1/R'_{dinding}$ = $1/0,429\ W/m^2degC$

= **2,33 W/m²degC**.

Terlihat dari perhitungan di atas bahwa penambahan kayu akan memperkecil nilai transmitan.

1.7.2 Menghitung Panas yang Menembus Elemen Bangunan

Soal:

Seperti soal 1.7.1, luas dinding (3)(6) m^2. Suhu udara di dalam ruangan 27°C. Suhu udara luar 30°C. Matahari tidak mengenai dinding secara langsung.

1. Hitunglah panas yang mengalir dari permukaan luar dinding ke permukaan dalam, menurut soal 1.7.1 soal 1!
2. Hitunglah panas yang mengalir dari permukaan luar dinding ke permukaan dalam, menurut soal 1.7.1 soal 2!

Jawaban soal 1:

Karena sinar-matahari-langsung tidak mengenai dinding, maka suhu permukaan luar dinding dianggap sama dengan suhu udara luar!

$U_{dinding}$ = $3,29\ W/m^2degC$; $A_{dinding}$ = (3)(6) m^2 = 18 m^2; ΔT = (30-27) degC = 3 degC.

Panas yang menembus dinding, $\mathbf{Q_c}$ = **A.U.ΔT** W.
= (18)(3,29)(3) W.
= **177,7 W.**

Jawaban soal 2:

Dengan penambahan kayu, $U_{dinding}$ menjadi $2,33\ W/m^2degC$.
Panas yang menembus dinding, $\mathbf{Q_c}$ = **A.U.ΔT** W.
= (18)(2,33)(3) W.
= **125,8 W.**

Terlihat dari hasil perhitungan bahwa penambahan kayu akan mengurangi panas yang menembus dinding hingga 51,9 W. Namun perlu diingat bahwa di iklim tropis, bangunan cenderung memiliki bukaan lebar sehingga apabila jendela dibuka lebar-lebar maka suhu udara luar akan relatif sama dengan suhu udara dalam. Dengan demikian kedua permukaan dinding

akan menjadi sama pula suhunya. Akibatnya, tidak akan terjadi aliran panas yang melewati dinding. Sebaliknya, pada bangunan ber-AC, jendela harus ditutup dan suhu udara luar dan dalam sangat berbeda sehingga pada dinding terjadi aliran panas dari sisi luar ke dalam.

1.7.3 Menghitung Panas yang Menembus Kaca

Soal:

Hitunglah panas yang menembus kaca bening selebar (1)(2) m^2, apabila sinar-matahari-langsung bersudut 60° dari jendela. Radiasi matahari = 700 W/m^2. (Ingat sudut datang adalah sudut antara garis sinar matahari dan garis tegak lurus dinding! Jadi $\beta = 90\text{-}60 = 30°$).

Jawab:

Untuk sudut datang 30°, kaca bening mempunyai θ = 0,7 (didapat dari brosur, atau website perusahaan kaca!).

Panas yang menembus kaca $\mathbf{Q_s}$ = **A.I.θ W.**

= (2)(700)(0,7) W.

= **980 W.**

Ingat, karena θ kaca sudah memperhitungkan sudut datang matahari, maka I tidak perlu dikalikan dengan cosβ!

1.7.4 Menghitung Suhu Benda oleh Radiasi Matahari Langsung

Soal:

Elemen dinding seperti pada 1.7.1 soal 1 (tanpa pelapis kayu di sebelah dalam) menghadap ke timur. Luas dinding (3)(6) m^2. Radiasi matahari (I) = 900 W/m^2. Suhu udara di dalam ruangan (T_i) = 27°C. Suhu udara di luar (T_o) = 29°C. Dinding luar dicat warna hijau medium dengan absorpsi (α_p) = 0,59. Matahari mengenai dinding dengan sudut datang 30°. Abaikan bilangan serap bahan dinding!

1. Hitunglah panas permukaan luar dinding!
2. Hitunglah panas yang merambat dari permukaan luar ke permukaan dalam!
3. Hitunglah panas yang merambat dari permukaan luar ke permukaan dalam apabila cat diganti dengan warna putih mengilap (α_p) 0,25!

Jawaban soal 1:

T_o = 29°C; serapan dinding diabaikan maka $\alpha_{total} = \alpha_p = 0{,}59$.

Karena matahari mengenai dinding dengan sudut datang 30°, maka I harus dikalikan dengan cos30°.

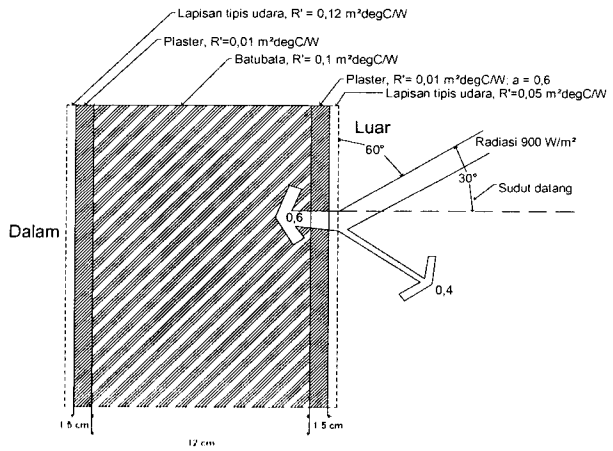
Untuk dinding yang menghadap ke timur, normal, f_o = 18,9 W/m^2degC.

$$\begin{aligned} \mathbf{T_s} &= \mathbf{T_o + (I.\alpha/f_o)\ ^oC.} \\ &= 29 + (900)(\cos 30)(0{,}59)/(18{,}9)\ ^oC. \\ &= 29 + (900)(0{,}87)(0{,}59)/(18{,}9)\ ^oC. \\ &= 29 + 24{,}44 \\ &= \mathbf{53{,}44\ ^oC.} \end{aligned}$$

Jadi suhu permukaan luar dinding yang terkena sinar-matahari-langsung (T_s) 53,44°C.

[Catatan: Dalam hal ini kita hanya memperhitungkan bilangan absorpsi, α_p, cat. Pada keadaan sebenarnya permukaan bahan yang dicat pun mempunyai bilangan absorpsi sendiri. Oleh karena itu jika bilangan absorpsi bahan diketahui maka kita dapat menghitung bilangan absorpsi total:

$\alpha_{total} = (\alpha_{bahan} + \alpha_{cat})/2$. Bilangan absorpsi dapat diperoleh dari buku-buku bahan dan dari website internet].



***Gambar 1.22** Sinar matahari mengenai permukaan dinding luar dengan sudut datang 30°*

Jawaban soal 2:

Karena dinding terkena radiasi matahari maka suhu permukaan luarnya naik melebihi suhu udara luar. Menurut hitungan soal 1, $T_s = 53{,}44^{\circ}C$.

Dengan demikian panas yang merambat dari sisi luar ke sisi dalam dihitung berdasarkan suhu permukaan yang terkena radiasi matahari tadi.

$$\begin{aligned} \mathbf{Q_c} &= \mathbf{A.U.\Delta T\ W.} \\ &= (18)(3{,}29)(53{,}44\text{-}27)\ \text{W.} \\ &= \mathbf{1565{,}78\ W.} \end{aligned}$$

Jawaban soal 3:

Mengecat dinding luar dengan cat putih mengilap yang mempunyai bilangan lebih kecil ($\alpha_p = 0{,}25$) dari cat warna hijau medium ($\alpha = 0{,}59$) akan menyebabkan radiasi yang diserap lebih kecil. Dengan kata lain, warna terang akan memantulkan lebih banyak radiasi matahari yang akan menyebabkan panas dinding berkurang.

$$\mathbf{T_s = T_o + (I.\alpha_{total}/f_o)\ ^{\circ}C.}$$

$$\begin{aligned} &= 29 + (900)(\cos 30)(0{,}25)/(18{,}9)\ ^{\circ}C. \\ &= 29 + (900)(0{,}87)(0{,}25)/(18{,}9)\ ^{\circ}C. \\ &= 29 + 10{,}36 \\ &= \mathbf{39{,}36\ ^{\circ}C.} \end{aligned}$$

Panas yang merambat ke sisi dalam dinding:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q_c} &= \mathbf{A.U.\Delta T\ W.} \\ &= (18)(3{,}29)(39{,}36\text{-}27)\ \text{W.} \\ &= \mathbf{731{,}79\ W.} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas dapat dilihat bahwa mengecat dinding luar dengan warna terang akan mengurangi panas dinding cukup besar yang pada akhirnya akan mengurangi panas ruangan! Catatan: Ingat bahwa perhitungan tersebut mengabaikan emisivitas dinding! Jika dinding mempunyai emisivitas tinggi maka panas dinding akan segera dipancarkan kembali ke lingkungan sekitar sehingga suhu dinding tidak setinggi perhitungan di atas!

[Catatan: Perhitungan di atas memakai asumsi kondisi statis (*steady state*). Dalam keadaan sebenarnya, panas membutuhkan waktu untuk merambat dari satu sisi ke sisi lain. Bahan tipis dan bukan isolator panas seperti seng tentu akan mengalirkan panas dengan cepat dari satu sisi ke sisi lain, sedangkan pada bahan tebal dan bersifat isolator panas, seperti dinding batubata satu batu, misalnya, panas memerlukan waktu lama untuk mengalir dari satu sisi ke sisi lain, hingga lebih dari 5 jam!]

1.7.5 Menghitung Kecepatan Angin di Ketinggian Tertentu

Soal:

Diketahui kecepatan angin di tempat terbuka (lapangan udara) pada ketinggian 10 m adalah 10 m/dtk. Berapakah kecepatan angin di unit apartemen setinggi 30 m dari muka tanah yang terletak di pusat kota dekat lapangan udara tadi. Diasumsikan kecepatan angin di atas *boundary layer* lapangan udara dan pusat kota sama!

Jawab:

Lapangan Udara

Kategori 2, $\varphi_1 = 0{,}15$ (lihat **Gambar 1.18** dan **Tabel** 1.12)

V_{10} = 10 m/dtk.
h_1 = 10 m.
$h_{bl\,1}$ = 300 m.
$V_{bl\,1}$ = ?

Pusat Kota

Kategori 4, $\varphi_2 = 0{,}36$ (lihat **Gambar 1.18** dan **Tabel** 1.12)

V_{30} = ?
h_2 = 30 m.
$h_{bl\,2}$ = 500 m.
$V_{bl\,2} = V_{bl\,1}$

Rumus $\mathbf{V_h = V_{bl}\,(h/h_{bl})^{\varphi}\ m/dtk.}$

$$\begin{aligned} V_{bl\,1} &= V_h/(h_1/h_{bl\,1})^{\varphi_1}\ \text{m/dtk.} \\ &= 10/(10/300)^{0{,}15}\ \text{m/dtk.} \\ &= 16{,}7\ \text{m/dtk.} \end{aligned}$$

Di soal diasumsikan kecepatan angin di atas *boudary layer* lapangan udara dan pusat kota sama, $V_{bl\,1} = V_{bl\,2}$.

$$\begin{aligned} V_{h\,2} &= V_{bl\,2}\,(h_2/h_{bl\,2})^{\varphi_2}\ \text{m/dtk.} \\ &= 16{,}7(30/500)^{0{,}36}\ \text{m/dtk.} \\ &= \mathbf{6{,}07\ m/dtk.} \end{aligned}$$

Jadi kecepatan angin yang datang di unit apartemen setinggi 30 m di pusat kota = V_{30} = 6,07 m/dtk.

1.7.6 Menghitung Debit Aliran Udara Melalui Jendela Akibat Angin Luar

Soal:

Angin datang dengan kecepatan 2 m/dtk tegak lurus bidang jendela.

1. Hitunglah debit udara yang melalui jendela, apabila luas efektif jendela *inlet* sama dengan jendela *outlet*, yaitu 1,5 m^2!
2. Hitunglah debit udara yang melalui jendela, apabila luas jendela *inlet* 1,5 m^2 dan luas jendela *outlet* 3m^2!
3. Hitunglah debit udara yang melalui jendela, apabila luas jendela *inlet* 3,0m/dtk dan luas jendela *outlet* 1,5 m/dtk! Di ruangan tersebut tidak terdapat partisi yang mengganggu aliran angin.

Jawaban soal 1:

Luas jendela *inlet* dan *outlet* sama.

A_i = 1,5 m^2 ; A_o = 1,5 m^2.
V = 2 m/dtk.
C_v = 0,55 (ambil nilai rata-rata 0,5 dan 0,6 untuk arah angin datang tegak lurus jendela)

Rumus **Q = C_vAV m^3/dtk.**
= (0,55)(1,5)(2) m^3/dtk.
= **1,65 m^3/dtk.**

Jawaban soal 2:

Luas jendela *inlet* dan *outlet* tidak sama, $A_i < A_o$
A_i= 1,5 m^2 ; A_o = 3,0 m/dt.
V= 2 m/dtk.
C_v= 0,55 (ambil nilai rata-rata 0,5 dan 0,6 untuk arah angin datang tegak lurus jendela)

Lihat ***Tabel 1.13***, karena A_i:A_o = 1,5:3,0 = 1: 2, maka C_v harus dikalikan 1,27.
Ingat luas jendela yang dipakai dalam rumus adalah luasan yang kecil.

Rumus **Q = C_vAV m^3/dtk.**
= (0,55)(1,27)(1,5)(2) m^3/dtk.
= **2,0955 m^3/dtk.**

Jawaban soal 3:

Luas jendela *inlet* dan *outlet* tidak sama, $A_i > A_o$
A_i = 3,0 m^2 ; A_o = 1,5 m^2
V = 2 m/dtk.
C_v = 0,55 (ambil nilai rata 0,5 dan 0,6 untuk arah angin datang tegak lurus jendela)

Lihat ***Tabel 1.13***, karena A_i:A_o = 3,0:1,5 = 2:1 maka C_v harus dikalikan 0,63.

Ingat luas jendela yang dipakai dalam rumus adalah luasan yang kecil. Jadi walau luas *inlet* 3,0 m^2, yang dipakai 1,5 m^2.

Rumus **Q = C_vAV m^3/dtk.**
= (0,55)(0,63)(1,5)(2) m^3/dtk.
= **1,0395 m^3/dtk.**

Bila (1), (2) dan (3) dibandingkan, terlihat bahwa luas *outlet* > *inlet* memberikan debit yang lebih besar.

1.7.7 Menghitung Aliran Udara yang Diperlukan untuk Mempertahankan Suhu Ruang

Soal:

Hitunglah aliran udara yang diperlukan agar suhu ruang dapat dipertahankan 27°C, apabila udara luar 25°C dan di dalam rumah terdapat sumber panas dari 2 orang yang sedang bersantai (@150 W) dan 2 lampu yang mengeluarkan panas masing-masing 100 W.

Jawab:

H = (2)(150 W)+(2)(100 W) = 500 W.
t_i = 27°C.
t_o = 25°C.
C_p = 1025 J/kg°C.
ρ = 1,2 kg/m^3.

Rumus $Q = H/60C_p\rho(t_i-t_o)$ **m³/dtk.**
$= 500/60(1025)(1,2)(27-25)$ m³/dtk.
$= 500/147600$ m³/dtk.
$=$ **0,003 m³/dtk.**

Jadi dengan volume aliran udara sebanyak 0,003 m³/dtk sudah cukup untuk mempertahankan suhu ruang agar tetap. Apabila lebih besar dari itu maka suhu udara ruangan akan turun mendekati suhu udara luar.

1.7.8 Menghitung Aliran Udara yang Diperlukan untuk Mempertahankan Suhu Ruang dengan Memperhitungkan Volume Ruang

Soal:

Hitung aliran udara yang diperlukan agar suhu ruang dapat dipertahankan 27°C, apabila udara luar 25°C dan di dalam rumah terdapat sumber panas dari 2 orang yang sedang bersantai (@150W) dan 2 lampu yang mengeluarkan panas masing-masing 100W. Volume ruang 27m³. Apabila ruang tersebut memiliki jendela di kedua sisi, masing-masing seluas 0,8m², hitunglah kecepatan angin yang melalui jendela tersebut!

Jawab:

$H = (2)(150\text{ W})+(2)(100\text{ W}) = 500$ W.
$t_i = 27°C.$
$t_o = 25°C.$
$V = 27$ m³.
$A = 0,8$ m².

$N = H/0,33V(t_i-t_o)$
$= 500/0,33(27)(27-25)$
$= 28,06$
$Q = VN/3600$ **m³/dtk.**
$= (27)(28,06)/3600$ m³/dtk.
$= 0,21045$ m³/dtk ~ **0,21 m³/dtk.**

Kecepatan angin yang melewati jendela V = Q/A = 0,21/0,8 = 0,26 m/dtk. Walau suhu ruangan dapat dipertahankan untuk tidak naik, kecepatan serendah itu (di jendela) tidak akan terasa pada kulit. Agar terjadi penyejukan fisiologis maka diperlukan kecepatan antara 0,5 - 1 m/dtk. Masalahnya, biasanya di iklim tropis lembab kecepatan angin sangat rendah.

1.7.9 Menghitung Aliran Udara oleh Perbedaan Suhu

Soal:

Hitunglah aliran udara yang terjadi oleh perbedaan suhu di atrium, apabila jarak antara jendela bawah (*inlet*) dan jendela atas (*outlet*) 10m (dihitung dari tengah jendela). Suhu udara dalam ruang 27°C, udara luar 25°C. Luas *inlet* 1m², luas *outlet* 2 m².

Jawab:

$t_i = 27°C.$
$t_o = 25°C.$
$A_i = 1$ m².
$A_o = 2$ m².
$h = 10$ m.

Lihat ***Tabel 1.14***, karena $A_i:A_o$=1:2 maka C perlu dikalikan 1,27. Pada rumus, A diisikan luas bukaan efektif, yang berarti dipilih luas bukaan yang kecil.

$Q = CAh(t_i - t_o)$ **m³/dtk**
$= (0,121)(1,27)(1)(10)(27-25)$ m³/dtk.
$= 3,0734$m³/dtk ~ **3,1 m³/dtk**

Kecepatan angin yang melewati jendela bawah V = Q/A = 3,1/1 = 3,1 m/dtk.

1.7.10 Menghitung Kenyamanan Ruangan

Soal:

Hitunglah kenyamanan termal ruang berdasarkan indeks PMV yang dirasakan oleh orang yang sedang bersantai (duduk membaca koran, M, met = 1 = 58 W/m²); berpakaian ringan (clo = 0,19; ekivalen dengan 0,029 m²degC /W); temperatur udara ruang 27°C, kelembaban relatif udara, RH, 50% dan rata-rata radiasi permukaan ruang dianggap sama dengan temperatur udara ruang. Kecepatan angin = 0,1 m/dtk.

Jawab:

Orang bersantai mempunyai kecepatan metabolisme 58 W/m².
$C_{res} = 0,0014.M.(34-t_a)$ W/m².
$0,0014.58.(34-27)$ W/m².
$0,0014.58.10$ W/m².
$0,57$ W/m².

Kelembaban udara 50% pada temperatur 27°C ekivalen dengan tekanan 1850 N/m^2 (Pascal), lihat ***Gambar 1.6***.

E_{res} $= 1{,}72.10^{-5}.M.(5867 - p_a)$ W/m^2.
$= 1{,}72.10^{-5}.58.(5867\text{-}1850)$ W/m^2.
$= 1{,}72.10^{-5}.58.(4367)$ W/m^2.
$= 400735.10^{-5}$ W/m^2.
$= 4$ W/m^2.

E_c $= 3{,}05.10^{-3}.[5733 - 6{,}99.(M\text{-}W) - p_a] + 0{,}42.(M\text{-}W\text{-}58{,}15)$ W/m^2.
$= 3{,}05.10^{-3}.[5733 - 6{,}99.(58\text{-}\ 0) - 1850] + 0{,}42.(58\text{-}0\text{-}58{,}15)$ W/m^2.
$= 3{,}05.10^{-3}.[3477.58] + 0{,}063$ W/m^2.
$= 10{,}61 + 0{,}063$ W/m^2.
$= 10{,}67$ W/m^2.

t_{sk} $= 35{,}7 - 0{,}028.(M\text{-}W)$ °C.
$= 35{,}7 - 0{,}028.(58\text{-}0)$ °C.
$= 34{,}08$°C.

Pakaian ringan 0,19 clo = 0,029 m^{2}degC/W.

$I_{cl} = 0{,}029$ m^{2}degC/W, karena $I_{cl} < 0{,}078$ m^{2}degC/W maka
$f_{cl} = 1{,}00 + 1{,}29.I_{cl}$
$= 1{,}00 + 1{,}29.0{,}029$
$= 1{,}00 + 0{,}037$
$= 1{,}04$

Untuk menghitung H diperlukan t_{cl} dan h_{cl}. Karena t_{cl} dan h_{cl} saling tergantung, maka untuk menghitung kedua nilai tersebut dilakukan secara iteratif. Tulislah dengan bantuan program Basic sederhana untuk menghitung kedua nilai tersebut!

h_c $= 2{,}38.(t_{cl}\text{-}t_a)^{0{,}25}$ atau
h_c $= 12{,}1.(V_{ar})^{0{,}5}$

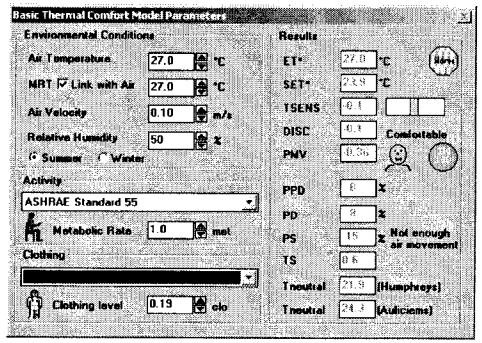
Logikanya, apabila kecepatan angin semakin tinggi, h_c akan semakin besar.

t_{cl} $= t_{sk} - I_{cl}k_1f_{cl}[(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] - I_{cl}f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)$
setelah t_{cl} ditemukan (sesuai nilai h_c yang besar) maka
II $\varepsilon\sigma(A_r/A_{Du})f_{cl}[(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] + f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)$

dan

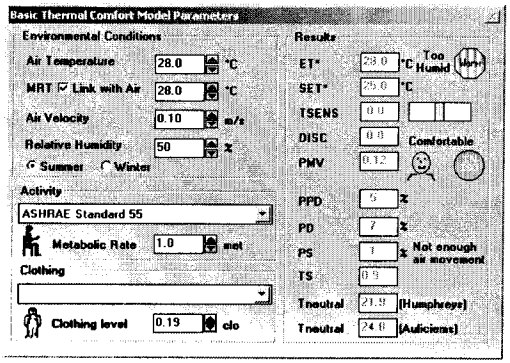
PMV $= (0{,}303.e^{-0.036M} + 0{,}028)[(M\text{-}W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]$

Dari pengecekan dengan program ASHRAE Thermal Comfort diperoleh nilai PMV = -0,35 dan PPD = 8% (Lihat Gambar 1.23). Itu berarti kondisi ruangan cukup nyaman dengan kecenderungan sejuk. Seandainya ada 100 orang dimintai pendapat, kira-kira hanya 8 orang (8%) yang akan merasa tidak nyaman. Apabila suhu dinaikkan menjadi 28oC, PMV akan menjadi 0,12 dan PPD menjadi 5%. Ruangan masih terasa nyaman dengan kecenderungan hangat (Lihat ***Gambar 1.24***).



Gambar 1.23 *Kondisi 1 ruang menurut program ASHRAE Thermal Comfort*

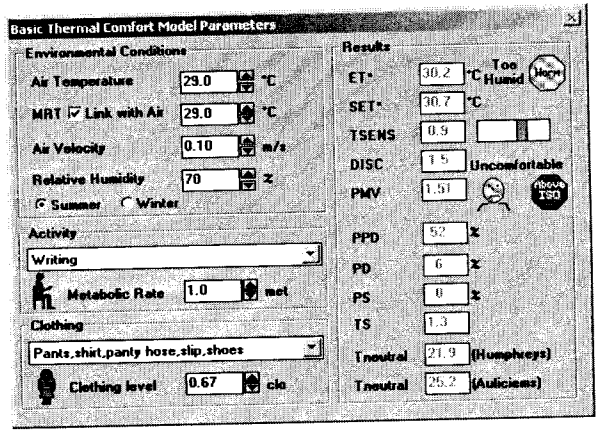
Pada kedua perhitungan tersebut, temperatur rata-rata radiasi permukaan ruang (MRT) dianggap sama dengan temperatur udara ruang (T). Pada keadaan nyata, seringkali dinding terkena sinar-matahari-langsung sehingga menjadi panas. Dalam kondisi tersebut MRT dapat lebih tinggi daripada T.



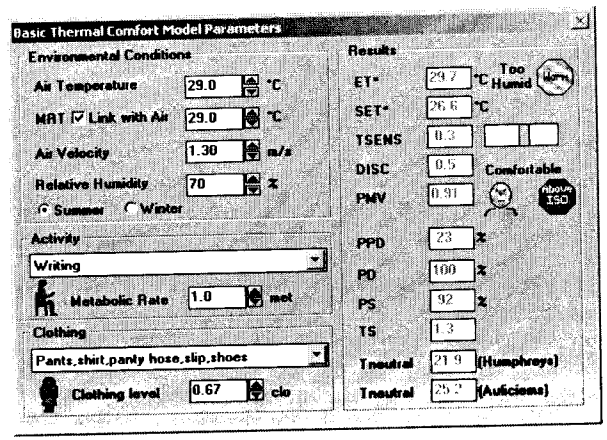
Gambar 1.24 *Kondisi 2 ruang menurut program ASHRAE Thermal Comfort*

Dapat dicoba untuk kondisi rata-rata di Yogya dengan temperatur udara 29°C, kelembaban 70%, tanpa angin, dengan pakaian sopan ringan, dan berkegiatan menulis. Terlihat bahwa kondisi tidak nyaman (lihat ***Gambar 1.25***). Namun dengan menaikkan kecepatan angin hingga 1,3 m/dtk memakai kipas angin, kondisi tersebut dapat diperbaiki sehingga menjadi nyaman (Lihat ***Gambar 1.26***).

Perlu diingat, untuk perkantoran, kecepatan angin perlu dibatasi hingga maksimal 1,5 m/dtk. Lebih besar dari itu lembaran kertas akan beterbangan.



Gambar 1.25 *Kondisi kenyamanan termal pada umumnya di Yogyakarta, menurut program ASHRAE Thermal Comfort*



Gambar 1.26 *Perbaikan kondisi di Yogyakarta dengan memakai kipas angin untuk menaikkan kecepatan angin*

1.7.11 Mencari Rekomendasi Desain dengan Tabel Mahoney

Soal:

Carilah rekomendasi desain bangunan untuk Yogyakarta dengan menggunakan tabel Mahoney.

Jawab:

Langkah 1

Isilah Tabel A1. Tabel ini hanya untuk catatan lokasi saja dan tidak memengaruhi perhitungan.

Tabel A1

Lokasi	Yogyakarta
Garis Bujur	110°
Garis Lintang	8° Lintang Selatan
Ketinggian	100 m

Langkah 2

Isilah Tabel A2 dengan data dari Badan Meteorogi dan Geofisika. Apabila tidak ada, cobalah ke website NASA:

(http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen). Mereka mempunyai data cukup lengkap berdasarkan catatan satelit. Rentang rata-rata bulanan merupakan pengurangan maksimum rata-rata bulanan dengan minimum rata-rata bulanan.

Tabel A2

Temperatur udara, °C

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Tinggi	TRT
Maksimum rata rata bulanan	30,6	30,3	31,7	31,5	31,2	30,9	29,9	31,1	31,7	32,2	30,4	30,3	32,2	27,3
Minimum rata rata bulanan	23,1	23,3	23,7	23,8	23,1	23,1	22,4	22,5	23,5	23,5	23,3	23,2	22,4	7,8
Rentang rata rata bulanan	7,5	7	8	7,7	8,1	7,8	7,5	8,6	8,2	8,7	7,1	7,1	Rendah	RRT

TRT = Temperatur rata-rata tahunan; RRT = Rentang rata-rata tahunan

Langkah 3

Isilah Tabel A3 dengan data kelembaban. Pada kelompok kelembaban, isikan nilai 1 hingga 4 sesuai Tabel A4.

Tabel A3

Kelembaban udara, %

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Maksimum rata-rata bulanan, a.m.	93	93	93	94	93	93	86	92	90	90	93	93
Minimum rata-rata bulanan, p.m.	71	71	66	65	66	67	69	59	60	58	71	72
Rata-rata	82	82	79,5	79,5	79,5	80	77,5	75,5	75	74	82	82,5
Kelompok kelembaban	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tabel A4

Kelompok kelembaban	Jika rata-rata RH:
1	Di bawah 30%
2	30-50%
3	50-70%
4	Di atas 70%

Langkah 5

Isilah Tabel A5 dengan data curah hujan dan arah angin.

Tabel A5

Curah hujan dan angin

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Curah hujan, mm	10,2	19	16,7	15,4	7,9	13,5	5,9	6,7	9,4	7,9	24,1	20	157

Arah angin utama	BD	BD	BD	S	S	BD	BD	S	S	S	BD	BD
Arah angin sekunder												

Tabel A6

Batas kenyamanan

Kelompok kelembaban	TRT di atas 20°C		TRT 15-20°C		TRT di bawah 15°C	
	Siang	Malam	Siang	Malam	Siang	Malam
1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18

Langkah 6

Isilah Tabel B1 dengan suhu maksimum rata-rata bulanan dan minimum rata-rata bulanan pada deret yang disediakan. Kemudian berdasarkan Tabel A6, isilah batas kenyamanan siang atas dan bawah baik berdasarkan maksimum rata-rata bulanan maupun minimum rata-rata bulanan.

Pada deret tegangan termal siang dan malam, isikan kode P (panas) apabila temperatur rata-rata di atas batas, N (nyaman) apabila temperatur rata-rata di dalam batas, atau D (dingin) apabila temperatur rata-rata di bawah batas.

Tabel B1

Diagnosis

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TRT
Maksimum rata-rata bulanan	30,6	30,3	31,7	31,5	31,2	30,9	29,9	31,1	31,7	32,2	30,4	30,3	27,3
Kenyamanan siang: atas	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	
Kenyamanan siang: bawah	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
Minimum rata-rata bulanan	23,1	23,3	23,7	23,8	23,1	23,1	22,4	22,5	23,5	23,5	23,3	23,2	
Kenyamanan malam: atas	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	
Kenyamanan malam: bawah	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
Tegangan termal: siang	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
Tegangan termal: malam	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	

P (panas) apabila temperatur rata-rata di atas batas.
N (nyaman) apabila temperatur rata-rata di dalam batas.
D (dingin) apabila temperatur rata-rata di bawah batas.

Langkah 7

Isikanlah angka 1 pada setiap kotak pada Tabel B2 berdasarkan komposisi yang sesuai Tabel B3. Jumlahkan pada kolom Total. Catatan: Kebetulan saja bahwa pada kasus Yogyakarta yang terisi hanya deret L1. Untuk lokasi lain, beberapa deret dapat terisi sekaligus.

Tabel B2

Indikator

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Lembab: L1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
L2													0
L3													0
Kering: K1													0
K2													0
K3													0

L Lembab

K Kering

Tabel B3

rti	Indikator	Tegangan panas		Curah hujan	Kelompok kelembaban	Rentang rata-rata temperatur bulanan
		Siang	Malam			
Pergerakan udara sangat diperlukan	L1	P			4	
		P			2, 3	Kurang dari 10°C
Pergerakan udara diinginkan	L2	N			4	
Perlindungan terhadap hujan diperlukan	L3			Di atas 200 mm		
Kapasitas panas diperlukan	K1				1, 2, 3	Lebih dari 10°C
Tidur di ruang terbuka diinginkan	K2		P		1, 2	
		P	N		1, 2	Lebih dari 10°C
Perlindungan terhadap dingin	K3	D				

Langkah 8

Isikan temuan Tabel B2 hasil langkah 6 pada Total Indikator di Tabel C. Dari setiap kolom di Total Indikator, lihatlah ke bawah dan berilah tanda pada rentang yang sesuai. Sebagai contoh, di rekomendasi Layout kita menandai kotak di samping kotak 1 karena kita mempunyai K1 = 0, sedangkan rentang 0-10 ada di kotak 1. Direkomendasi peruangan, kita menandai kotak di samping kotak 3, karena kita memiliki L1 = 12 yang sesuai rentang 11-12. Begitulah seterusnya.

Tabel C

Spesifikasi yang disarankan

Total indikator dari Tabel B2					
L1	L2	L3	K1	K2	K3
12	0	0	0	0	0

Layout

			0-10			X	1	Orientasi ke utara dan selatan (sumbu panjang timur-barat)
			11, 12		5-12			
					0-4		2	Rancangan bangunan kompak dengan halaman di tengah
Peruangan								
11,12						X	3	Peruangan terbuka untuk penetrasi hembusan angin
2-10							4	Seperti 3, tetapi diberi perlindungan terhadap angin panas dan dingin
0, 1							5	Susunan kompak

Pergerakan angin

3-12						X	6	Bangunan mempunyai ruang tunggal, tidak bersekat-sekat, penyediaan pergerakan angin permanen
1, 2			0-5					
			6-12				7	Bangunan mempunyai ruang ganda, penyediaan pergerakan angin temporer
0	2-12							
	0, 1						8	Tidak diperlukan pergerakan angin

Bukaan

			0, 1		0	X	9	Bukaan luas, 40-80%
			11, 12		0, 1		10	Bukaan sangat kecil, 10-20%
Kondisi lain							11	Bukaan sedang, 20-40%

Dinding

			0-2			X	12	Dinding ringan, waktu perambatan panas pendek
			3-12				13	Dinding luar dan dalam berat

Atap

			0-5			X	14	Atap ringan, berisolator
			6-12				15	Atap berat, waktu perambatan panas lebih dari 8 jam

Tidur di luar

				2-12			16	Diperlukan ruangan untuk tidur di luar

Perlindungan terhadap hujan

		3-12					17	Diperlukan perlindungan terhadap curah hujan lebat

Tabel D

Saran untuk detail

Total indikator dari Tabel B					
L1	L2	L3	K1	K2	K3
12	0	0	0	0	0

Ukuran bukaan

			0, 1		0	X	1	Besar: 40-80%
					1-12		2	Sedang: 25-40%
			2-5					
			6-10				3	Kecil: 15-25%
			11, 12		0-3 4-12		4	Sangat kecil: 10-20%
							5	Sedang: 25-40%

Letak bukaan

3-12						X	6	Di sebelah utara dan selatan, setinggi tubuh manusia, pada sisi datangnya angin
1-2			0-5					
			6-12				7	Seperti di atas, bukaan juga diterapkan pada dinding dalam
0	2-12							

Perlindungan bukaan

					0-2	X	8	Hindari sinar-matahari-langsung
		2-12					9	Lindungi dari curah hujan

Dinding dan lantai

			0-2			X	10	Ringan, kapasitas panas rendah
			3-12				11	Berat, perambatan panas lebih dari 8 jam

Atap

10-12			0-2			X	12	Ringan, permukaan mengilap, berongga
			3-12				13	Ringan, diberi isolator panas
0-9			0-5					
			6-12				14	Berat, perambatan panas lebih dari 8 jam

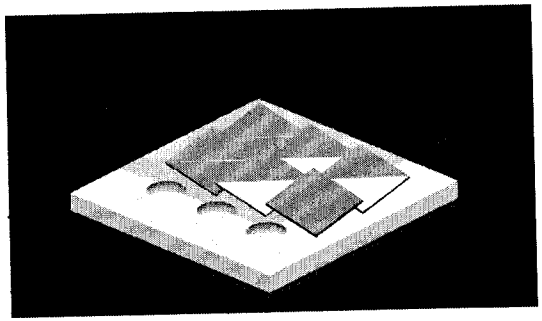
Fitur luar

				1-12			15	Ruang untuk tidur di luar
		1-12					16	Drainase hujan cukup

1.8 GALERI

Bab ini akan memberikan beberapa ilustrasi rancangan yang mempertimbangkan ventilasi alami.

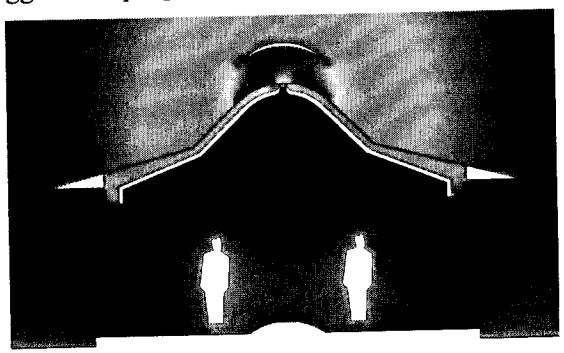
Prototipe modul atap dikembangkan secara teoretis oleh Satwiko. Material ini memiliki refleksi radiasi matahari ekstrem, hampir 100%, agar atap tetap dingin. Terdiri atas susunan (*cluster*) elemen-elemen silikon berlapis perak seluas 1 cm^2 yang bergerak terkendali oleh mikroprosesor agar radiasi yang datang selalu dipantulkan tegak lurus ke atas di manapun posisi matahari. Dengan demikian kesilauan dapat dihindari. Cluster dilindungi oleh bahan supersin agar dicapai transparansi maksimal.



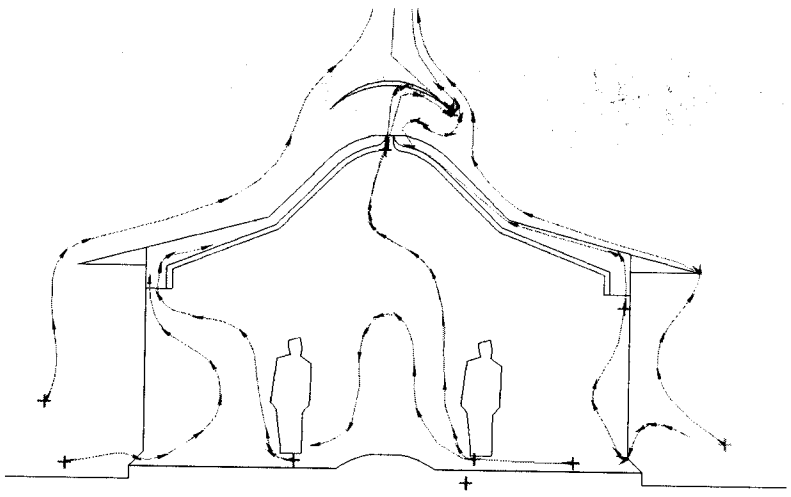
***Gambar 1.27** Atap dengan refleksi radiasi matahari hampir 100% (Satwiko, 2003)*

Radiasi matahari (Satwiko)

Sistem Ventilasi Atap Tenaga Angin dan Surya (SIVATAS) dikembangkan oleh Satwiko dan Leksono. Sistem ini memacu ventilasi vertikal dengan mengefisienkan aerodinamis atap dan penangkapan radiasi panas matahari oleh bahan atap. Penelitian dilakukan sepenuhnya dengan metode simulasi komputer menggunakan program CFD-ACE+ ver. 6.

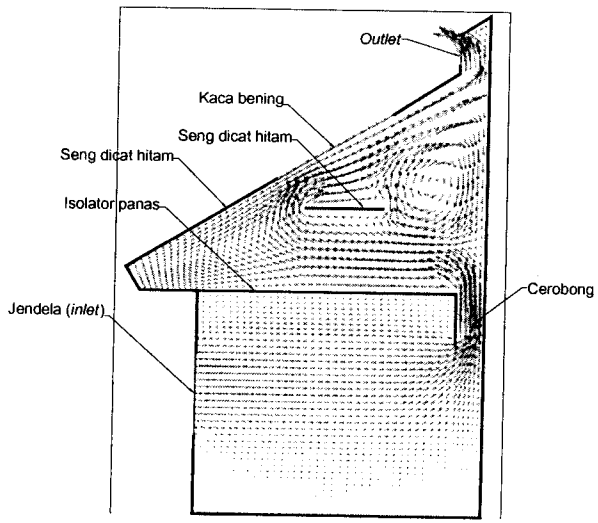


***Gambar 1.28** Distribusi kecepatan angin pada bangunan sederhana dengan sivatas (Satwiko, 2004)*



***Gambar 1.29** Aliran angin pada bangunan dengan sivatas (Satwiko, 2004)*

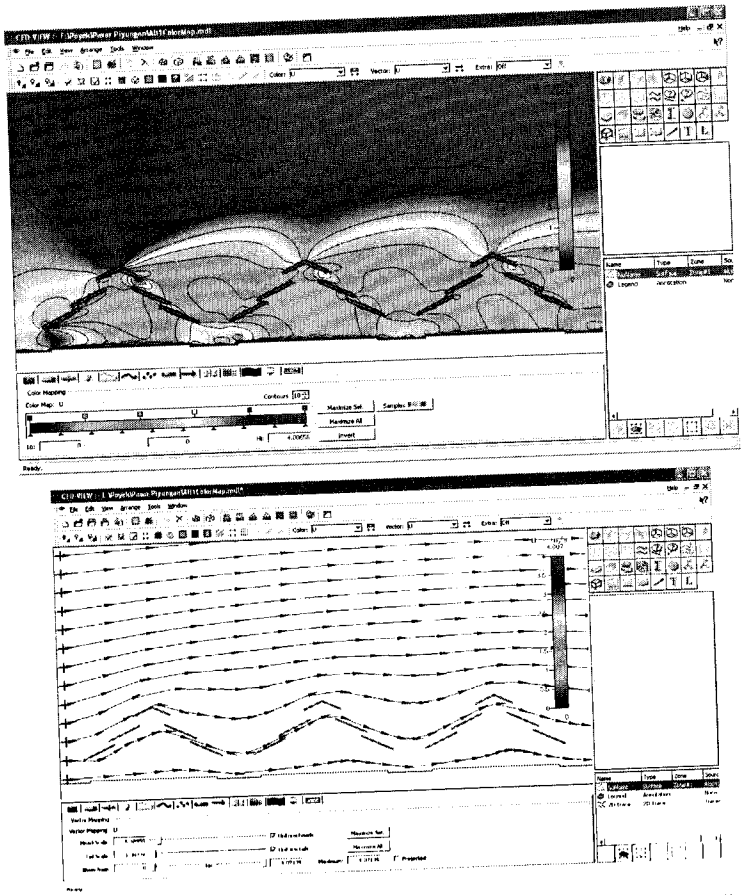
Cerobong Atap Indonesia dikembangkan oleh Satwiko dengan program CFD Fidap ver. 7.0. Sistem ini digunakan untuk menggerakkan ventilasi vertikal dengan bantuan panas matahari. Pengaplikasiannya perlu hati-hati untuk menghindari urban heat islands).



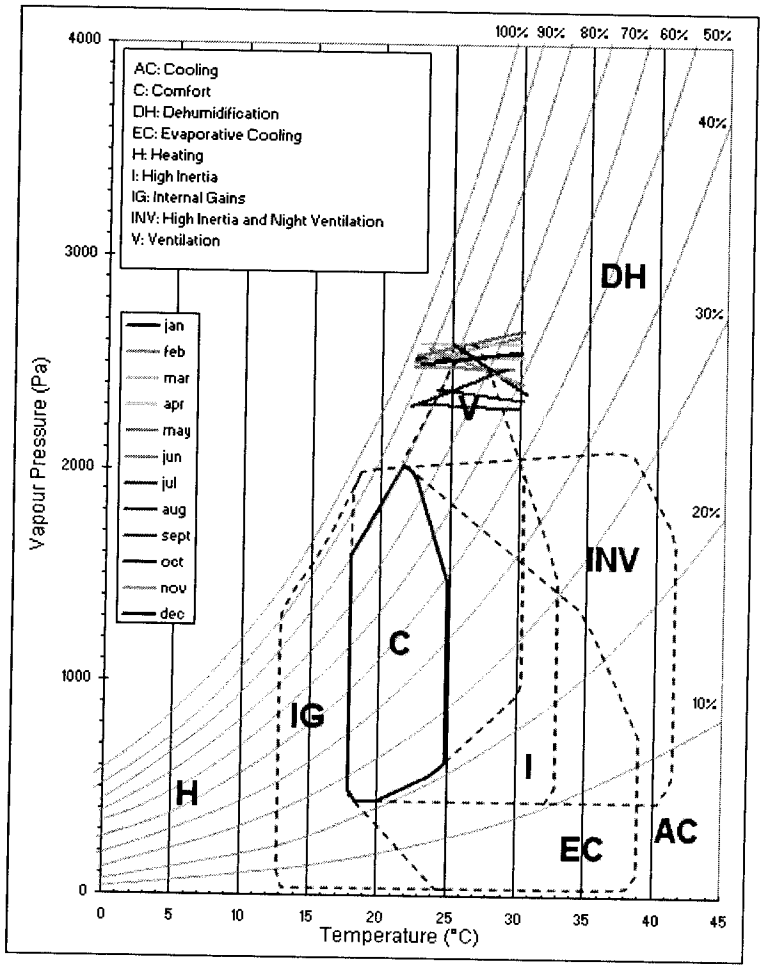
***Gambar 1.30** Cerobong atap Indonesia (Satwiko, 1994)*

Di bawah ini adalah contoh studi aerodinamika awal massa pasar di Yogya yang bermanfaat untuk:

1. Memperoleh gambaran pola aliran serta distribusi kecepatan angin agar dapat diketahui apakah pada area aktivitas kecepatan angin mencukupi standar.
2. Menghindari aliran udara panas ke area aktivitas.
3. Mengusahakan bau tidak terakumulasi.
4. Menghindari susunan massa yang dapat mengganggu aliran angin.

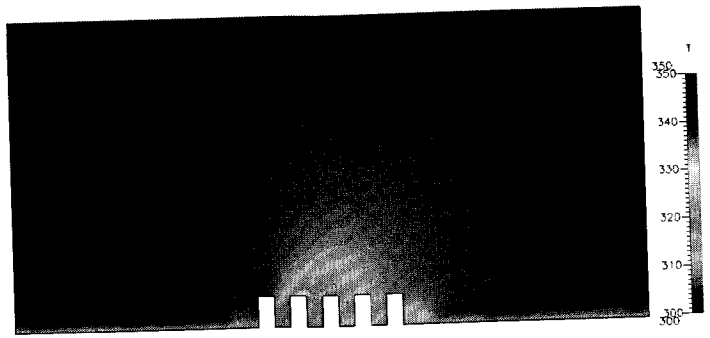


Gambar 1.31 *Studi aerodinamika massa bangunan (Satwiko, 2008)*



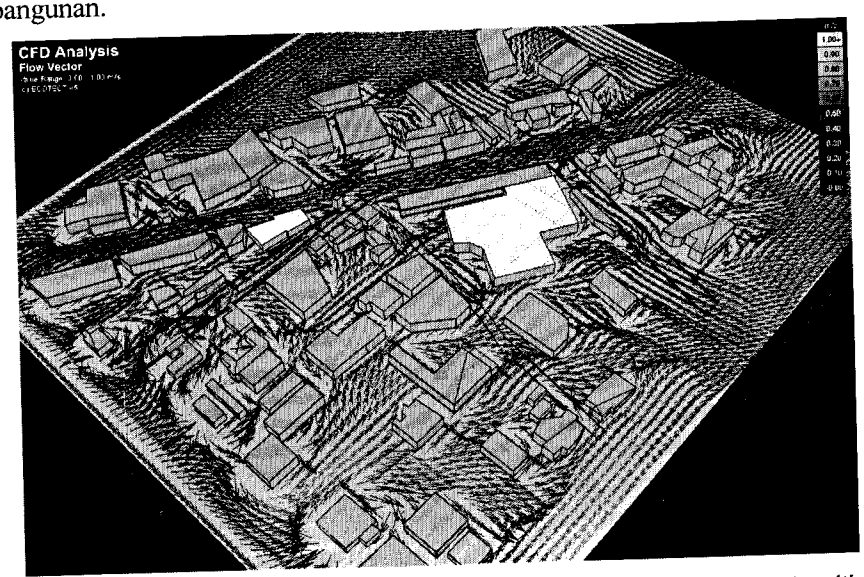
Gambar 1.32 *Hasil analisis iklim tipikal kawasan Purdowo, Kabupaten Sleman, DIY dengan metode Givoni (Satwiko, 2007)*

Terlihat bahwa sebenarnya sepanjang tahun kondisi termal di kawasan ini tidaklah nyaman (di luar zona C, *Comfort*). Bulan Juli – Agustus agak nyaman bila ada pergerakan udara (sedikit berada di zona V, *Ventilation*). Hal tersebut karena matahari berada di utara relatif terhadap kawasan Purdowo (Analisis iklim dan bioklimatis Givoni memakai program yang ditulis oleh Karen Allaker, Belgia.)



Gambar 1.33 *Contoh simulasi dengan program CFD (Computational Fluid Dynamic) (Satwiko, 2002.)*

Gambar 1.33 menunjukkan fenomena *urban heat island* (suhu di area terbangun akan lebih tinggi daripada area sekitarnya). Dalam simulasi tersebut suhu udara atap 77°C dan rasip tinggi bangunan dan jarak bangunan (H/W) = 2. Suhu ruang terbuka 50°C. Suhu dinding adiabatis dan diasumsikan terbayangi. Urban heat island mulai terbentuk di tengah kelompok bangunan.



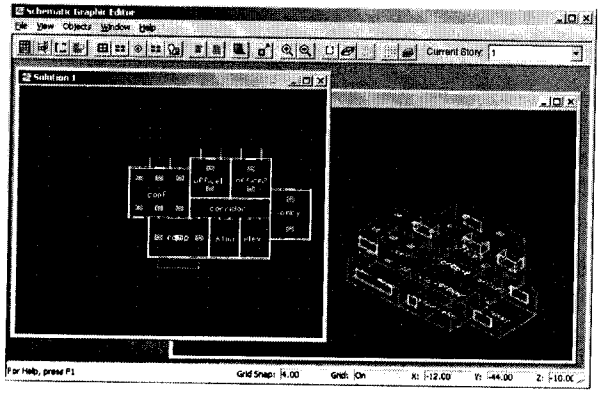
Gambar 1.34 *Contoh studi aliran angin di lingkungan, kasus kecamatan Ngaglik, Sleman, DIY dengan program Ecotect (Satwiko, 2008)*

1.9 Alamat Penting di Internet

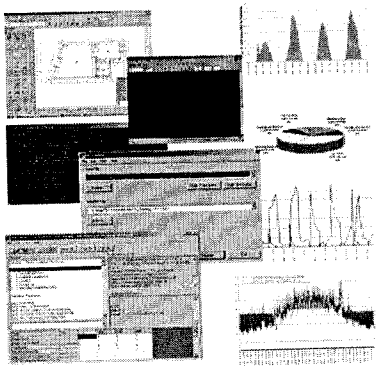
http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/platforms.cfm/pagename=platforms/pagename_menu=pc; penyedia freeware yang berhubungan dengan ventilasi.
http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen; data klimatologi cukup lengkap untuk lokasi di seluruh dunia (termasuk Indonesia) dari NASA.
http://www.aivc.org/; jurnal Air Infiltration and Ventilation Centre.
http://www.ashrae.org/ ; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
http://www.bse.polyu.edu.hk/Research_Centre/Fire_Engineering/journal/journal.html; menyajikan hasil-hasil penelitian ventilasi terbaru.
http://www.bsjonline.co.uk/index.asp ; Building Services Journal.
http://www.epa.gov/iaq/glossary.html; istilah-istilah dalam ventilasi.
http://www.ises.org/ises.nsf!Open ; International Solar Energy Society.

1.10 Software

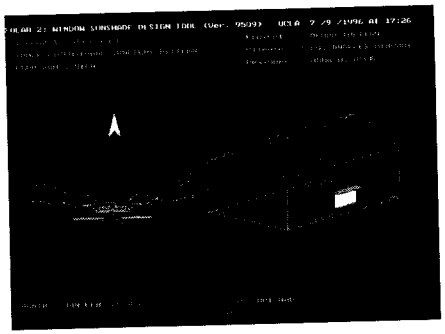
Sub-bab ini memberikan alamat *website* yang menyediakan *freeware* dan *shareware* yang dapat di-*download*. Beberapa di antaranya memberikan versi demo yang bagus untuk belajar. Selain itu ada beberapa *website* yang menyediakan fasilitas evaluasi secara *online*.



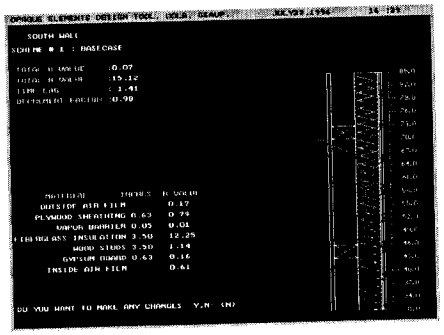
Gambar 1.35 *Building design Advisor (http://gaia.lbl.gov/BDA/)*



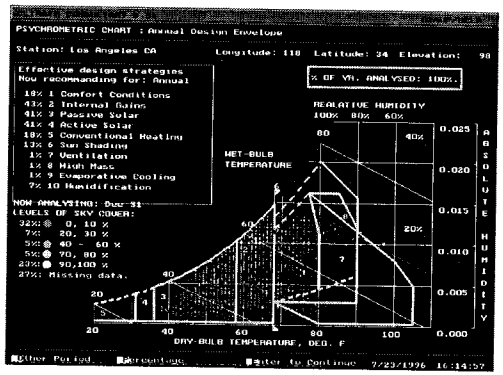
Gambar 1.36 *Energy plus*
(http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/)



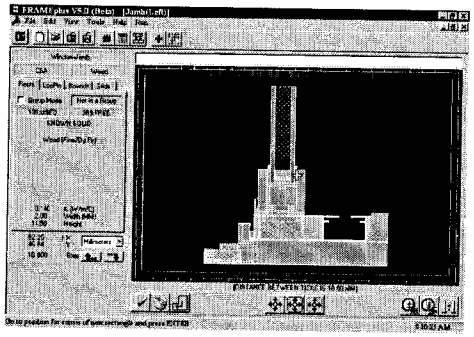
Gambar 1.37 *Opaque*
(http://www.aud.ucla.edu/energy-design-tools)



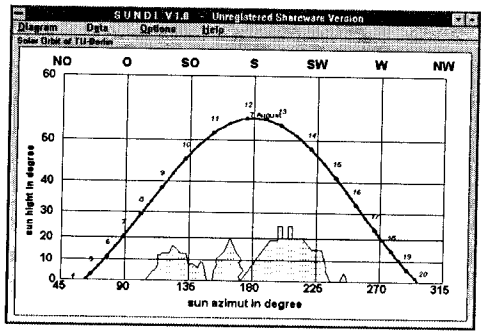
Gambar 1.38 *Solar-2*
(http://www.aud.ucla.edu/energy-design-tools/)



Gambar 1.39 *Climate consultant*
(http://www.aud.ucla.edu/energy-design-tools/)

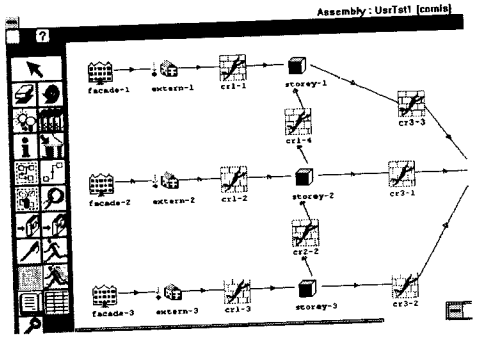


Gambar 1.40 *Frame screen (Frame.jpg)*
(http://www.frameplus.net/description.html)

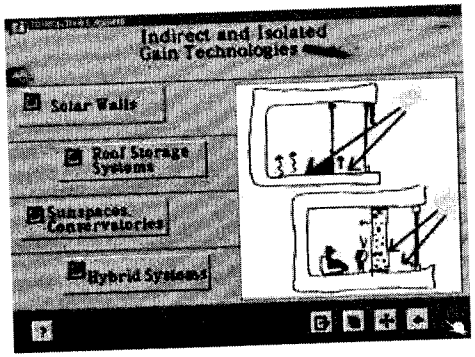


Gambar 1.41 *Sundi*
(http://www.volker quaschning.de/software/sundi/index_e.html)

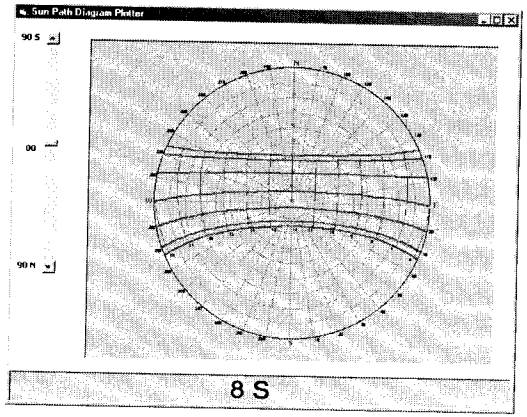
Gambar 1.42 WUFI ORNL/IBP
(http://www.ornl.gov/ORNL/BTC/moisture/)



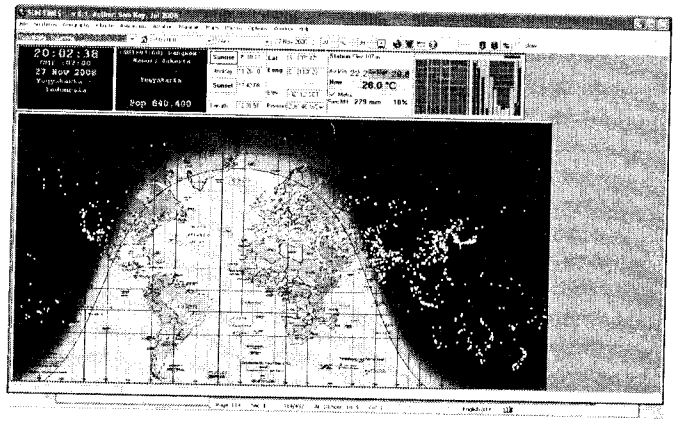
Gambar 1.43 COMIS
(http://www-epb.lbl.gov/comis/users.html)



Gambar 1.44 IPSE
(http://kahl.net/ipse/)



Gambar 1.45 Sun path diagram
(http://www.met.wau.nl/metlukweb/drawsun.zip)



Gambar 1.46 Suntimes
(www.softpedia.com/get/Science-CAD/Sun-Times.shtml)

BAB 2
VENTILASI BUATAN

Mungkin sebagian besar kita yang hidup di Indonesia meyakini bahwa kita beruntung hidup di negara tropis lembab yang nyaman ini. Kita tidak pernah, misalnya, harus mengalami musim dingin yang menusuk tulang, atau musim panas yang membakar. Alam pun memberikan kepada kita berlimpah ruah flora, fauna dan tambang. Ringkasnya, semua tersedia bagi kita yang hidup di daerah tropis bak sorga ini. Sejak kecil pun kita telah dibiasakan memuja-muji negeri kita yang makmur. Hidup semestinya mudah di sini.

Segala kelimpahan alam itu juga tercermin dalam arsitektur yang berkembang. Arsitektur tradisional, misalnya, diyakini dikembangkan oleh nenek-moyang kita dengan metode *trial and error*, pelahan-lahan, hingga mereka mendapatkan karya-karya arsitektur yang serasi bagi seluruh aspek kehidupan mereka. Budaya, adat istiadat dan iklim memberikan pengaruh pada kematangan arsitektur tadi. Arsitektur lokal diyakini oleh para arsitek mengandung banyak pesan kebijaksanaan yang menyebabkannya serasi dan selaras dengan lingkungan. Suatu keadaan yang di dunia modern saat ini semakin ditekankan: arsitektur yang ramah lingkungan. Senafas dengan semangat itu kita mengenal banyak istilah seperti: *sustainable architecture*, *green architecture*, *natural architecture*, *eco-architecture*, *solar architecture* dan *passive architecture*.

Semangat tersebut perlu dimiliki oleh setiap arsitek. Semangat untuk menciptakan karya-karya arsitektur yang menyejahterakan penghuninya sekaligus menjaga kelestarian bumi. Banyak yang dapat dikerjakan untuk itu, misalnya memakai bahan-bahan bangunan yang tidak merusak lingkungan dan memanfaatkan sumber energi alam non-nuklir dan non-fosil (angin, cahaya matahari, panas matahari, air, bio-massa, dll.) Pemanfaatan pencahayaan alami dan ventilasi alami perlu diusahakan secara maksimal.

Namun demikian ada satu pertanyaan besar yang sering tidak kita sadari bersama-sama: Benarkah kita hidup di iklim yang secara termal nyaman? Kenyataan bahwa kita tidak pernah mengalami badai salju seperti di daerah dingin, maupun badai pasir seperti di daerah gurun panas, tidak serta merta berarti kita nyaman! Banyak buku yang dengan tegas menyatakan bahwa ventilasi alami sulit diusahakan di iklim tropis lembab seperti di Indonesia. Memang, suhu udara tidak pernah setinggi di daerah iklim panas. Suhu di iklim tropis lembab pada umumnya antara 24 - 32°C. Namun, kelembaban yang tinggi (60 - 95%) dan kecepatan angin yang amat rendahlah yang menjadi persoalan. Sebenarnya kita hidup di lingkungan yang tidak nyaman secara termal. Kita perlu bertanya dengan jujur kepada diri kita sendiri, apakah iklim di Indonesia ini secara termal *comfortable* (nyaman) ataukan *tolerable* (masih tertahankan)? Penulis secara pribadi yakin bahwa jawaban yang kedualah yang benar. Sebenarnya kita setiap hari berusaha menahan ketidak-nyamanan termal lingkungan dengan cara, salah satunya, menurunkan produktivitas kerja.

Secara ilmiah dapat dibuktikan bahwa semakin tinggi aktivitas seseorang, semakin besar panas yang dihasilkan oleh tubuhnya. Dalam kehidupan sehari-hari kita merasakan bahwa pada saat keadaan lingkungan panas maka kita akan mengurangi kegiatan fisik kita; bahkan kalau perlu tidur siang (*siesta*). Atau kita dapat melakukan pekerjaan dengan lebih santai, pelahan dan tidak terlalu serius. Ini semua adalah salah satu contoh respons alami tubuh kita untuk mengatasi ketidaknyamanan termal. Kebalikan dari situasi tersebut, di daerah iklim sedang (*temperate climate*) maupun dingin (*cold climate*), orang dapat bekerja lebih lama karena panas tubuh memang diperlukan.

Di jaman yang serba bergerak cepat ini, manusia dituntut selalu aktif dan produktif. Oleh karena itu kita tidak dapat lagi berpura-pura seolah tinggal di negeri yang nyaman, sementara itu kita bekerja dengan tidak produktif. Kita harus mengakui bahwa iklim Indonesia bukanlah lingkungan yang secara termal nyaman. Perasaan mudah lelah, gerah, tidak nyaman adalah nyata. Mengusahakan lingkungan menjadi lebih nyaman secara termal diperlukan agar kita dapat bekerja lebih produktif. Salah satu cara adalah dengan memakai mesin penyejuk udara, atau yang dikenal sebagai *Air Conditioner* (AC).

Pemasangan AC tidak harus ditabukan pada karya arsitektur Indonesia. Namun yang perlu selalu menjadi semangat adalah mengusahakan agar AC dapat bekerja lebih efisien dan efektif. Para arsitek perlu memahami konsep

penghawaan buatan agar rancangan mereka dapat membantu AC bekerja dengan efisien dan efektif. Intinya, jika lingkungan luar sudah tidak nyaman, maka kita perlu mempertimbangkan pemakaian AC. Ingat bahwa penghawaan alami sangat tergantung pada kualitas udara alami di lingkungan bangunan. Jadi kalau kualitas udara lingkungan tidak sehat dan nyaman, hal itu akan langsung berpengaruh pada ventilasi.

Penghawaan buatan dengan AC, jika dirancang dengan benar, mempunyai banyak keuntungan, terutama bila udara alami di sekitar bangunan berkualitas buruk. Beberapa keuntungan pemakaian AC adalah sebagai berikut:

- Suhu udara lebih mudah diatur. Di daerah tropis lembab yang rata-rata suhu udaranya tinggi, perbedaan suhu siang dan malam kecil, menurunkan suhu udara secara alami sangatlah sulit. AC dapat menurunkan suhu udara dengan cepat dan pada tingkat yang dikehendaki.
- Kecepatan dan arah angin mudah diatur.
- Kelembaban mudah diatur. Kelembaban udara di daerah beriklim tropis lembab ini sangat mengganggu dan memberikan kontribusi yang besar pada terjadinya ketidak-nyamanan termal. AC dapat mengatur (mengurangi) kelembaban.
- Kebersihan udara dapat dijaga. AC dilengkapi dengan penyaring yang akan menyaring debu dan bau. AC keluaran baru dilengkapi *filter* yang semakin baik untuk menjamin kesehatan udara.
- Karena ruang AC tertutup maka diperoleh keuntungan sampingan, yaitu kenyamanan akustik dan ketenangan.
- Serangga terbang dapat dicegah masuk ke dalam ruangan.
- AC keluaran baru dilengkapi dengan pembangkit ion negatif (*ionizer*) yang dapat membunuh bakteri, jamur, dan mengikat biang bau serta memberikan efek segar pada udara ruang.
- Karena ruang tertutup, bau di dalam ruang mudah diatur dan dipertahankan, misalnya dengan wewangian.

Sedangkan kekurangan AC yang utama terletak pada penggunaan energi yang boros. Pada bangunan ber-AC, energi listrik yang dipergunakan

untuk AC dapat mencapai 60% dari total energi. Namun mesin AC keluaran terakhir semakin hemat energi. Mungkin tidak akan lama lagi kita dapat menemukan sel surya yang mempunyai efisiensi tinggi dan AC yang sangat rendah konsumsi energinya sehingga kita dapat mengoperasikan AC terus-menerus dengan tenaga matahari. Kalau itu terjadi maka kita akan dapat memperoleh kenyamanan termal sepanjang hari secara gratis.

2.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Ventilasi Buatan

Sub-bab ini memberikan penjelasan singkat atas istilah-istilah yang sering kita temui ketika membicarakan AC. Bila memerlukan pengertian yang lebih lengkap dapat dilihat di Internet. Salah satunya:

`http://www.hvacmechanic.com/glossary/glossary_a.htm.`

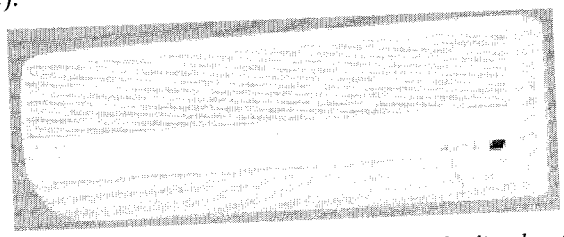
Ventilasi Buatan atau Penghawaan Buatan (*Artificial ventilation / Forced ventilation / Mechanical ventilation*) adalah penghawaan yang melibatkan peralatan mekanik. Penghawaan buatan sering juga disebut **pengondisian udara** (*air conditioning*), yaitu proses perlakuan terhadap udara di dalam bangunan yang meliputi suhu, kelembaban, kecepatan dan arah angin, kebersihan, bau, serta distribusinya untuk menciptakan kenyamanan bagi penghuninya. Dengan demikian pengondisian udara sebenarnya tidak hanya berarti menurunkan suhu (*cooling*) tetapi juga menaikkan suhu (*heating*). Di daerah tropis lembab yang suhu rata-ratanya tinggi, pengondisian udara (atau penghawaan buatan) diasosiasikan dengan penyejukan udara oleh mesin penyejuk udara atau mesin pengondisi udara yang dikenal luas dengan istilah **Air Conditioner** (AC). **Kipas angin listrik** (*electric fan*) tidak menurunkan suhu udara, tetapi hanya menggerakkan udara saja. Kipas angin listrik ada di antara penghawaan alami dan buatan. *Heating, Ventilating and Air-conditioning* (HVAC) adalah istilah umum sistem tata udara yang melibat-kan pemanasan, ventilasi dan pengondisian udara. Dalam sistem ini diatur suhu udara, kelembaban udara, catu udara segar, penyaringan polutan dan pergerakan udara di dalam ruang. HVAC modern mempertimbangkan kualitas udara, emisi gas rumah kaca dan konservasi energi (McDowall, 2006).

Ada banyak tipe mesin AC, namun secara garis besar dapat dibagi menjadi sebagai berikut:

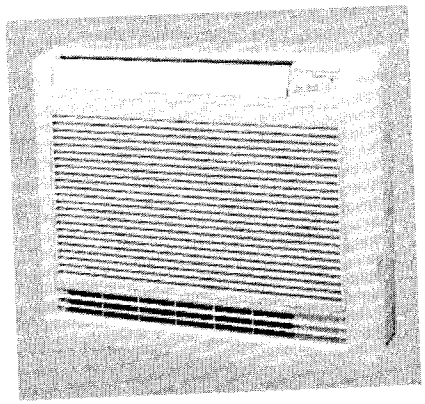
AC Unit

- **Tipe paket tunggal**, dikenal sebagai **tipe jendela** (*windows type*). Pada tipe ini seluruh bagian AC ada dalam satu wadah. AC tipe ini dipasang dengan meletakkan mesin langsung menembus dinding. Jadi dinding dilubangi sebesar AC tersebut. Karena seluruh komponen menjadi satu, AC ini agak sedikit bising (apalagi bila sudah lama tidak diservis!).
- **Tipe paket terpisah**, dikenal sebagai **tipe split** (*split type*). Sesuai namanya, AC ini mempunyai dua bagian terpisah, yaitu unit dalam ruang (*indoor unit*) dan unit luar ruang (*outdoor unit*). Unit luar ruang berisi kipas, kompresor dan kondensor untuk membuang panas, sedang unit dalam ruang berisi evaporator dan kipas untuk mengambil panas dari udara dalam ruangan. Antara unit dalam ruang dan luar ruang dihubungkan dengan pipa untuk bolak-balik refrigeran. Karena hanya pipa tersebut yang perlu menembus dinding maka pelubangan cukup kecil saja. Selain itu, karena unit yang cenderung bising ada di luar maka kebisingan dapat dikurangi. (Catatan: unit luar yang menempel langsung pada dinding ruang dapat merambatkan getaran ke dalam ruang dan menyebabkan kebisingan!). Tipe terpisah ini dapat berupa tipe **split tunggal** (*single split*), satu unit luar ruang melayani satu unit dalam ruang) dan dapat berupa tipe **split ganda** (*multi split*), satu unit luar ruang melayani beberapa unit dalam ruang). Selain itu, berdasarkan pemasangannya, tipe terpisah ini masih dapat dibagi lagi menjadi:
  - **Tipe langit-langit/dinding** (*ceiling/wall type*); *indoor unit* dipasang di dinding bagian atas.
  - **Tipe lantai** (*floor type*); *indoor unit* diletakkan di lantai. Tipe lantai ada yang berbentuk seperti almari, ada yang sebenar-nya sama dengan tipe langit-langit tetapi dipasang di lantai.
  - **Tipe kaset** (*cassette type*); *indoor unit* dipasang di langit-langit, menghadap ke bawah.
- **AC Terpusat** (*central AC*); AC tipe besar yang dikendalikan secara terpusat untuk melayani satu gedung besar, baik yang berpem-

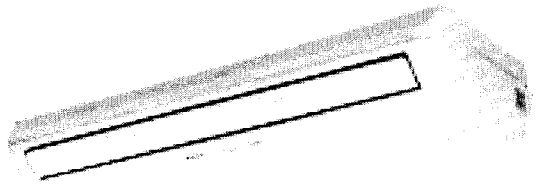
bagian ruang sederhana seperti toko grosir besar maupun berpembagian ruang rumit seperti bangunan tinggi perhotelan dan perkantoran. AC sentral melibatkan sistem jaringan distribusi udara (*ducting*) untuk mencatu udara sejuk ke dalam ruang dan mengambil kembali untuk diolah. Lubang tempat udara dari sistem AC masuk ke dalam ruangan disebut **difuser** (*diffuser*) sedang lubang tempat udara kembali dari dalam ruangan ke jaringan disebut **gril** (*grill*).



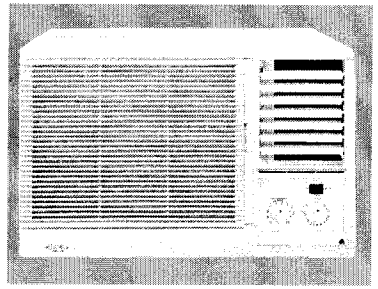
Gambar 2.1 *Unit indoor AC split yang dipasang di dinding buatan Daikin.*



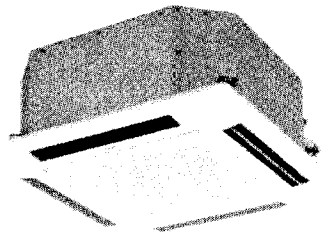
Gambar 2.2 *Unit indoor AC split yang dipasang di lantai buatan Daikin.*



Gambar 2.3 *Unit indoor AC split yang dipasang di dekat langit-langit buatan Daikin.*



Gambar 2.4 *AC tipe jendela Eolia – National.*



Gambar 2.5 *Unit indoor AC tipe kaset yang dipasang di langit-langit buatan National.*

Pada AC besar, selain unit utama berupa unit pendingin (*chiller*) yang mengolah refrigeran hingga siap mendinginkan, masih dilengkapi lagi dengan beberapa alat seperti:

- **Unit Pengolah Udara** (*Air Handling Unit*, AHU); sesuai namanya bagian ini adalah unit untuk mengolah udara yang akan dipergunakan untuk mengondisikan udara ruangan. Unit ini terdiri atas koil kondensor dan kipas (*fan*). Di AHU ini udara luar dimasukkan untuk dicampur dengan udara balik (dari dalam ruangan).
- **Unit Koil Fan** (*Fan Coil Unit*, FCU); ini adalah versi kecil dari AHU. Isinya sama, yaitu fan dan koil kondensor.
- **Sistem Saluran Udara** (*ducting system*).

Refrigeran (*refrigerant*) adalah zat yang menimbulkan efek pendinginan bila mengembang atau menguap. Dengan sifat tersebut, refrigeran dijadikan medium pengangkut kalor pada AC. Refrigeran yang terkenal adalah freon dan amoniak.

Walau mesin AC rumit, sebenarnya secara prinsip dapat dikelompokkan menjadi beberapa komponen, yaitu:

- **Kompresor** (*compressor*); inilah inti dari mesin AC, biasanya berupa tabung berwarna hitam. Di kompresor ini refrigeran dari evaporator yang berbentuk gas dan bertekanan rendah ditekan agar menjadi gas bertekanan tinggi. Walau dikompresor tidak ada tambahan kalor, karena ditekan, suhu refrigeran naik. Taruhlah dari 0°C ke 30°C. Kompresor berguna untuk mengalirkan refrigeran terus-menerus mengulangi siklus cair-gas-cair sambil membawa kalor dari dalam ruangan ke luar ruangan.

- **Kondensor** (*condenser*); pada AC tipe terpisah (*split*), kondensor adalah unit luar ruang (*outdoor unit*). Kondensor berisi kompresor, fan dan **koil kondensor** (*condensor coil* yang karena letaknya di luar disebut juga *outdoor coil*). Pada saat refrigeran yang berbentuk gas bertekanan tinggi melalui koil kondensor, sebagian panasnya (panas laten) dibuang ke udara bebas dengan pertolongan hembusan angin dari fan. Karena kehilangan panas, refrigeran berubah fase dari gas ke cair. Di koil kondensor tidak ada perubahan tekanan. Suhu menurun, taruhlah dari 30°C menjadi 26°C. Pada mesin AC besar, pendinginan dapat dilakukan dengan air.

- **Katup ekspansi** (*expansion valve*); berguna untuk menurunkan tekanan dan menyemprotkan refrigeran ke dalam evaporator. Karena tidak ada tambahan kalor, padahal tekanan diturunkan, maka suhu menjadi turun, taruhlah dari 26°C menjadi -4°C.

- **Koil Evaporator** (*evaporator coil*); pada AC tipe terpisah, koil evaporator ada di dalam *indoor unit* dan berguna untuk menguapkan refrigeran yang bertekanan rendah dengan cara mengambil kalor laten dari dinding koil evaporator tersebut. Suhu refrigeran naik dari, taruhlah, -4°C menjadi 0°C. Dinding koil evaporator akan mengambil kalor dari udara yang berhembus melewatinya. Agar perpindahan panas lebih besar dan lancar maka koil evaporator diberi **sirip-sirip** (*fins*) untuk memperluas permukaan perpindahan panas, dan udara didorong dengan fan. Dari sini refrigeran akan disedot oleh kompresor untuk mengulangi siklus.

Dengan terus-menerus mengulang siklus di atas, kalor dari udara di dalam ruangan akan semakin berkurang sehingga suhunya turun.

Air kondensasi (*condensation water*) adalah air yang berasal dari uap air yang mengembun. Semakin tinggi suhu udara, semakin besar kemampuannya menahan uap air. Sebaliknya, semakin rendah suhu udara, semakin berkurang kemampuannya untuk menahan uap air. Jika udara hangat lembab melewati permukaan benda yang bersuhu rendah maka akan terjadi perpindahan kalor dari udara ke benda tadi. Akibatnya, suhu udara turun dan kemampuannya menahan uap air jadi berkurang. Oleh karena itu sebagian uap air akan mengembun, dapat dilihat sebagai bintik-bintik air di permukaan dingin tadi. Pada koil evaporator, embun ini semakin lama semakin banyak, menetes, dan harus dibuang melalui pipa pembuangan. Itulah mengapa kita selalu melihat air menetes dari pipa pembuangan AC. Sebenarnya proses tersebut sama dengan bintik-bintik air yang menempel pada dinding luar gelas yang berisi es!

Proses penyejukan (atau pendinginan) udara adalah proses pengurangan kalor yang terkandung dalam udara. Untuk itu dikenal beberapa istilah:

- **Panas laten** (*latent heat*); panas yang menyebabkan perubahan fase. Panas yang bila dikurangkan atau ditambahkan akan menyebabkan suatu zat berubah fase, tanpa berubah suhunya.

- **Panas sensibel** (*sensible heat*); panas yang menyebabkan perubahan suhu. Panas yang bila dikurangkan atau ditambahkan akan menyebabkan suatu zat mengalami perubahan suhu tanpa mengalami perubahan fase.

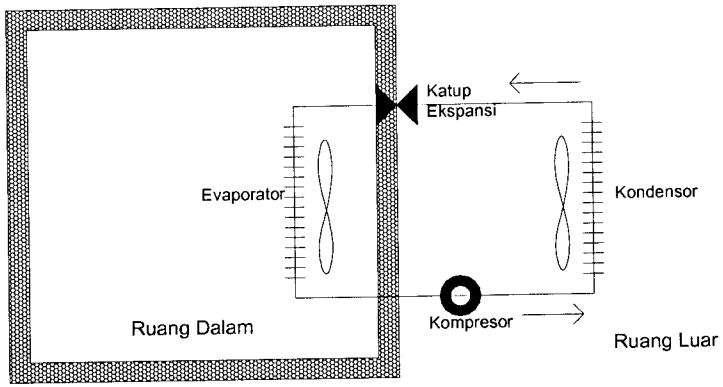
Entalpi (*enthalpy*) adalah jumlah panas total yang dibutuhkan suatu zat untuk naik dari satu suhu ke suhu yang lebih tinggi; merupakan jumlah dari panas laten dan panas sensibel.

Beban penyejukan (*cooling load*) adalah panas yang harus dibuang oleh AC dari dalam ruang keluar agar suhu udara di dalam ruang tidak naik dan tetap dalam batas kenyamanan termal. Beban penyejukan itu bisa dipresentasikan dengan Watt atau Btu. (Ingat *sejuk* dan *dingin* dalam percakapan sehari-hari dapatlah dipakai secara bergantian. Namun sebenarnya kita memakai mesin *penyejuk udara,* bukan *pendingin udara* karena kita hanya akan menjejukkan udara! Jika kita memakai mesin *pendingin udara* maka kita akan kedinginan dan mungkin membeku seperti daging beku pada mesin pendingin. Mau?)

Termostat (*thermostat*) adalah saklar yang peka terhadap suhu, berguna untuk mengendalikan kerja AC. Alat ini terdiri atas sensor suhu dan relai,

terletak di dalam ruang dan akan mengendalikan kerja sistem AC. Jika kita menginginkan udara di dalam ruang bersuhu tertentu, misalnya 24°C, maka kita dapat memprogram termostat pada 24°C. Alat tersebut akan menyebabkan AC bekerja terus untuk menurunkan suhu ruangan hingga mencapai suhu 24°C (biasanya lebih rendah sedikit). Bila suhu tersebut tercapai, maka termostat akan memerintahkan AC berhenti atau mengurangi kapasitas kerjanya. Bila suhu kemudian naik lagi, lebih tinggi dari 24°C, maka termostat akan memerintahkan AC bekerja kembali. Apa yang terjadi bila kita meletakkan termostat (atau sensor) di dekat sumber panas? Alat tersebut akan tertipu, mengira ruangan tersebut panas sehingga AC akan bekerja terus-menerus walau bagian ruangan yang lain sudah menjadi sangat dingin.

1 Btuh (*British Thermal Unit Hour*) adalah pemakaian energi sebesar 1 BTU dalam waktu 1 jam. Sedang **1 Btu** sendiri adalah panas yang diperlukan oleh 1 pon air untuk naik suhu 1 derajat Fahrenheit pada suhu 39,2 °F, di ketinggian permukaan laut. Panas yang dikeluarkan oleh sebatang korek api yang menyala kira-kira 1 BTU dan setara dengan 0,293 Wh. Kadang-kadang di lapangan kita sering mendengar 1 ton pendinginan, yaitu daya pendinginan yang dihasilkan oleh 1 ton es pada saat mencair dalam waktu 24 jam. 1 ton penyejukan ini setara dengan 12.000 Btuh, dan setara dengan 3.516 W (sekitar 3,5 kW)



***Gambar 2.6** Diagram proses penyejukan udara*

Penjernih udara (*air purifier*) adalah alat untuk menyaring udara agar bersih dari debu, asap rokok, serbuk sari bunga, bulu binatang, bakteri dan polutan lain. Inti dari alat ini adalah penyaring (filter) yang harus diganti secara berkala.

Pelembab (*humidifier*) adalah alat untuk mengontrol kelembaban udara agar tidak terlalu kering. Udara yang terlalu kering akan menyebabkan mata pedih, kulit bersisik, bibir kering dan timbul listrik statis. Lawan dari pelembab adalah pengering (*dehumidifier*) yang akan mengurangi kelembaban udara dalam ruangan. Udara yang terlalu lembab akan menyebabkan perasaan lengket di kulit dan mempercepat timbulnya jamur pada dinding (terutama pada keadaan ekstrem ketika dinding menjadi basah oleh bintik-bintik kondensasi).

Pembangkit ion negatif (*ionizer*) adalah alat yang dapat membangkitkan ion negatif dengan cara menambahkan sebuah elektron pada atom oksigen di udara melalui proses pelepasan listrik bertegangan tinggi atau penyinaran ungu-ultra (UV). Karena kelebihan elektron, atom oksigen tadi menjadi ion negatif yang kita perlukan. Secara umum, ion negatif adalah atom yang kelebihan elektron! Ion negatif dari atom oksigen memiliki efek yang paling besar bagi manusia. Sebaliknya, atom yang kehilangan elektron akan menjadi ion positif yang tidak kita inginkan (http://www.bright.net/~comtech/). Di alam, ion terjadi karena molekul udara terbelah akibat cahaya matahari, radiasi, serta pergerakan udara dan air. Ion negatif mem-buat udara terasa segar. Ion negatif melancarkan aliran oksigen ke otak. Kebun, taman, pedesaan adalah tempat-tempat yang berlimpah ion negative-nya sehingga kita merasakan kesegaran (2.000 - 4.000 ion negatif /cm^3). Bahkan di hutan, pantai dan air terjun bisa lebih dari 100.000 ion negatif /cm^3! Sebaliknya ruang ber-AC adalah tempat yang paling sedikit memiliki ion negatif (kurang dari 100 ion negatif /cm^3). Ion negatif oksigen ini sangat agresif untuk mengikat partikel melayang di udara (spora, asap rokok, serbuk sari, bakteri, dll.) sehingga menjadi berat, mengendap dan mudah dibersihkan. Dengan demikian udara ruangan menjadi bersih, tidak berbau dan tidak memancing alergi. Untuk ruangan ber-AC, ioniozer lebih efektif disbandingkan filter. Filter hanya akan menyaring partikel yang terbawa oleh udara yang melaluinya. Partikel di udara yang berada di sudut-sudut ruang, di kolong perabotan tidak akan tersaring. Ion negatif dapat tersebar ke sudut-sudut terpencil dan mengikat partikel tersebut.

Selain masalah-masalah teknis penyegaran udara yang berhubungan erat dengan teknologi baru (seperti *ionizer*), saat ini penghawaan buatan juga mulai diwarnai dengan *teknologi masa lampau* (dikenal sejak 4000 SM di Mesir) untuk menyegarkan dan menyehatkan badan dan pikiran, yaitu dengan aroma (bebauan). Bau-bauan dari tanaman obat dan bumbu (*herb*) sudah dikenal sejak zaman purba, menimbulkan efek tertentu bagi fisik dan

psikis manusia. Efek untuk penyembuhan dikenal dengan istilah terapi aroma (*aroma therapy*). Aroma berhubungan erat dengan budaya tertentu. Saat ini ada kecenderungan untuk memberikan aroma tertentu pada ruangan agar tercipta suasana yang sesuai dengan tema yang diinginkan (relaks, romatis, dll.) Lebih jauh, aroma tadi tidak sekedar membangkitkan suasana (atmosfer) tertentu namun juga diyakini mempunyai efek kesehatan atau penyembuhan bahkan membantu tidur. Aroma dilepaskan ke ruang dengan banyak cara, misalnya dengan membakar lilin aroma (*scent candle*) atau menuangkan minyak tumbuhan (*herb oil*) pada daunan kering yang ditaruh di mangkok hias. Sistem AC yang baru telah dirancang untuk memprogram pelepasan wewangian yang berbeda-beda.

(http://www.daidan.co.jp/english/english/technology/office/office_4.html).

2.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar

Prinsip utama mesin penyejuk udara (AC) adalah mengangkut kalor dari satu lokasi ke lokasi lain. Dalam konteks bangunan, tugas AC adalah mengangkut kelebihan kalor dari dalam ruang ke luar ruang. Jelaslah bahwa semakin banyak kalor yang harus diangkut, semakin berat tugas AC. Atau jika dibalik, bila kita ingin memakai AC secara hemat, kita harus mengusahakan bahwa penambahan panas (kalor) ke dalam ruang adalah sekecil-kecilnya.

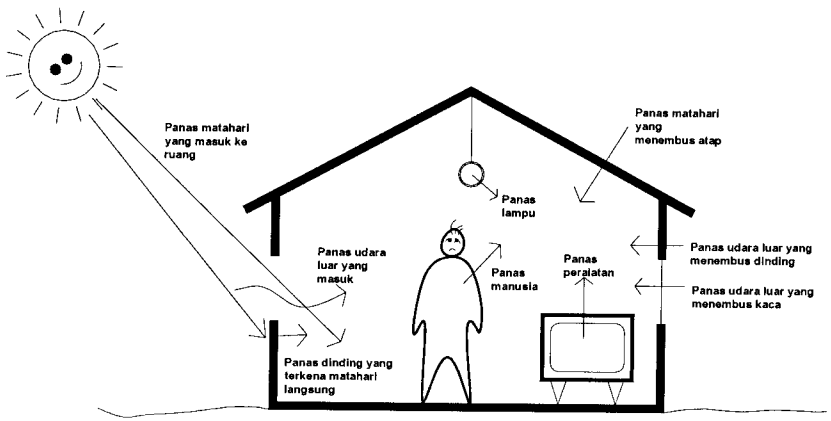
Mesin AC ada yang sangat besar dan rumit, seperti yang dipergunakan di bangunan pencakar langit. Ada juga yang kecil, yang tidak terlalu rumit. Ada yang membutuhkan energi listrik relatif kecil, sekitar 400W, namun ada juga yang sampai puluhan ribu watt. Pemilihan kapasitas AC sangat ditentukan oleh pertambahan panas ke dalam ruangan dan seberapa rendah suhu udara di dalam ruangan yang dikehendaki. Jika kita menginginkan suhu udara yang rendah di dalam ruangan maka tentu semakin banyak panas yang harus dibuang keluar.

Pertambahan panas di ruangan dapat diperoleh dari:

- Panas tubuh manusia dan makhluk hidup lain yang bersuhu tubuh hangat. Semakin giat kerja manusia, semakin besar panas yang dilepaskan oleh tubuhnya ke udara.
- Panas yang berasal dari peralatan rumah tangga seperti lampu, televisi, kompor, seterika dan *rice cooker*.

- Panas yang berasal dari selubung bangunan yang terkena langsung radiasi matahari. Atap dan dinding yang tak terlindungi akan menjadi panas dan panas ini akan merambat dari sisi luar ke sisi dalam atap dan dinding, kemudian dilepaskan ke udara di dalam ruangan.
- Panas yang berasal dari selubung bangunan akibat udara luar yang hangat. Jika ada perbedaan antara suhu udara luar dan dalam maka akan terjadi aliran panas dari sisi luar dinding ke sisi dalam dinding dan panas dilepaskan ke udara dalam ruangan.
- Panas yang berasal dari udara luar yang hangat yang masuk ke dalam ruangan, baik melalui jendela, pintu, maupun celah-celah yang ada pada bangunan.
- Panas dari radiasi matahari yang langsung masuk ke dalam ruangan melalui jendela, pintu dan lubang-lubang lain yang ada pada bangunan.

Seluruh panas tadi bila tidak dikeluarkan dari dalam ruangan akan menumpuk dan mengakibatkan suhu udara ruangan menjadi naik. Orang yang ada di dalamnya akan menjadi tidak nyaman.



***Gambar 2.7** Panas di dalam ruang*

Udara yang bersuhu lebih rendah akan berada di bawah udara yang bersuhu lebih tinggi. Udara sejuk yang keluar dari AC akan mengalir turun ke bawah dan mengambil panas (kalor) dari lingkungan sekitar. Ketika suhu bertambah, udara tersebut akan mengapung ke atas. Fan pada AC bermanfaat untuk mendorong udara sejuk yang keluar dari AC agak menjauh, selain menghisap udara yang kembali dari dalam ruang. Karena udara sejuk cenderung berada di bawah, maka difuser AC selalu dipasang di posisi tinggi. Jika difuser dipasang di dekat lantai, misalnya, maka udara sejuk hanya akan merayap di lantai sehingga efek penyejukan kurang besar. Pada ruang yang bersekat-sekat, walau sekat tidak penuh sampai langit-langit, namun dapat terjadi efek kolam, di mana udara sejuk hanya mengumpul di satu ruang.

Ruang ber-AC cenderung tertutup. Di satu sisi kondisi tersebut akan menghalangi polutan dari luar untuk masuk ke dalam ruangan. Di sisi lain, ketertutupan itu juga dapat berarti polutan di dalam ruangan tidak dapat dibuang keluar dengan leluasa. Pada sistem AC tanpa masukan udara segar, seperti pada AC tipe split, penumpukan polutan ini akan menyebabkan udara di dalam ruangan menjadi tidak sehat, bahkan berbahaya. Perasaan mual, pusing, lemas, berkeringat dingin, tertekan merupakan beberapa gejala yang telah lama dikaitkan dengan sistem penghawaan buatan yang buruk, yang sering dikenal sebagai *sick building syndrome*. ***Tabel 2.1*** memberikan pedoman tentang kualitas udara. Pengukuran kadar kandungan zat-zat tersebut dilakukan dengan alat khusus. Biasanya badan-badan pemantau lingkungan hidup (seperti Badan Pengendali Dampak Lingkungan dan Balai Teknik Kesehatan dan Lingkungan) menyediakan data kandungan zat dalam udara luar hasil pemantauan atau pengukuran di tempat-tempat tertentu.

Tabel 2.1 *Pedoman kualitas udara*

Polutan	Udara lingkungan					
	Kadar ($\mu g/m^3$)	Waktu tinggal (tahun)	Kadar ($\mu g/m^3$)	Waktu tinggal (jam)	Kadar (mg/m^3)	Waktu tinggal (jam)
Sulfur dioksida (SO_2)	80	1	365	24	13	8
Partikel-partikel	75	1	260	24	5	8
Karbon monoksida (CO)	-	-	10^4	8	55	8
Ozon	-	-	235	1	0,2	8
Hidrokarbon	-	-	160	3	-	

Polutan	Udara lingkungan					
	Kadar ($\mu g/m^3$)	Waktu tinggal (tahun)	Kadar ($\mu g/m^3$)	Waktu tinggal (jam)	Kadar (mg/m^3)	Waktu tinggal (jam)
Formaldehida (HCHO)	-	-	-	-	0,12	Ber-langsung menerus
Nitrogen dioksida (NO_2)	100	1	-	-	9	Sebentar
Nitrit oksida (NO)	-	-	-	-	30	8
Amoniak (NH_3)	500	1	7000	-	-	-
Aseton (CH_3COCH_3)	7000	24 jam	24000	0,5	-	-
Dikloroetana (CH_3CHCl_2)	2000	24 jam	6000	0,5	-	-
Etilasetat ($CH_2COOC_2H_5$)	14000	24 jam	42000	0,5	-	-
Trikloroetilen (CH_3CCl_3)	2000	1	16000	0,5	-	-
Air raksa (Hg)	2	24 jam	-	-	-	-
Timah (Pb)	1,5	0,25	-	-	-	-

Sumber: Awbi, 1991 (berdasarkan standar ASHRAE dan Health and Safety Executive, HMSO)

Bentuk polusi udara luar yang utama adalah partikel benda yang melayang. Partikel tersebut masuk ke dalam ruangan melalui bukaan (jendela, pintu) dan celah-celah selubung bangunan akibat tekanan angin. Partikel tersebut dapat disaring dengan filter yang ada pada AC. Partikel dapat berupa debu, asap, kabut dan benda hidup (jamur, bakteri, virus, serbuk sari). Jika diameternya lebih besar dari 75 μm maka akan mengendap dengan cepat. Namun jika diameternya lebih kecil dari 50 μm maka akan mengambang dalam waktu lama di udara dan menjadi erosol (*aerosol*). Untuk orang yang alergi, pertikel tersebut sangatlah mengganggu. Di ruang ber-AC yang tertutup, penyebaran virus (misalnya influenza) dari satu orang ke orang lain akan berlangsung dengan efektif.

***Tabel 2.2** Sumber, konsentrasi dan perbandingan konsentrasi di dalam dan luar ruang beberapa polutan*

Polutan	Sumber polusi di dalam ruang	Kemungkinan konsentrasi di dalam ruang	Perbandingan konsentrasi di dalam dan luar ruangan	Lokasi
Karbon monoksida	Peralatan pembakaran, mesin, sistem pemanasan yang rusak	100 ppm	>>1	Kantor, rumah, mobil, toko
Partikel yang dapat terhisap	Kompor, perapian, rokok, kondensasi zat yang mudah menguap, semprotan erosol, masakan	100 – 500 $\mu g/m^3$	>>1	Rumah, kantor, mobil, fasilitas umum, bar, rumah makan
Uap organik	Pembakaran, zat pelarut, produk resin, pestisida, semprotan erosol	-	>1	Rumah, rumah makan, fasilitas umum, kantor, rumah sakit
Nitrogin dioksida	Pembakaran, kompor gas, pemanas air, pengering, rokok, mesin	200 – 1000 $\mu g/m^3$	>>1	Rumah
Sulfur dioksida	Sistem pemanasan	20 $\mu g/m^3$	<1	
Partikel mengambang keseluruhan tanpa ada kegiatan merokok	Pembakaran, sistem pemanasan	100 $\mu g/m^3$	1	Rumah, kantor, transportasi, rumah makan
Sulfat	Korek api, kompor gas	5 $\mu g/m^3$	<1	
Formaldehida	Isolator, perekat, papan partikel	0,05 – 1,0 ppm	>1	Rumah, kantor
Asbes	Anti kebakaran	10^6 serat/m^3	1	Rumah, sekolah, kantor
Serat mineral dan sintetis	Pakaian, babut, papan dinding	-	-	Rumah, sekolah, kantor
Karbon dioksida	Pembakaran, manusia, binatang	3000 ppm	>>1	Rumah, sekolah, kantor
Organisme kasat nata	Manusia, piaraan, tikus, serangga, tanaman, jamur, pelembab, AC	-	>1	Rumah, rumah sakit, sekolah, kantor, fasilitas umum
Ozon	Lecutan listrik, Sumber sinar ungu-ultra	0,02 ppm 0,2 ppm	<1 >1	Pesawat terbang Kantor

Sumber: Awbi, 1991 (berdasarkan ASHRAE, 1989)

Salah satu parameter polusi udara dalam ruang adalah karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan oleh proses metabolisme tubuh manusia. Semakin banyak jumlah orang yang berada di satu ruang, semakin banyak pula CO_2 yang dihasilkan. Produksi CO_2 dapat dihitung dengan rumus:

$$G = 4.10^{-5}\ M.A$$

dengan G = produksi CO_2, liter/dtk
M = tingkat metabolisme, W/m^2
A = luas permukaan tubuh, m^2

Laki-laki dewasa yang sedang bersantai (M = 70 W/m^2; A = 1,8m^2) rata-rata akan menghasilkan CO_2 sekitar 0,0005 l/dtk (18 l/jam). ***Tabel 2.3*** menunjukkan kebutuhan udara segar yang meningkat sesuai peningkatan metabolisme tubuh. Udara segar dari luar dibutuhkan untuk menjaga kandungan O_2 pada udara kotor tidak lebih rendah dari 16,3% dan kandungan CO_2-nya tidak lebih dari 0,5%. Kebutuhan tersebut berasumsi bahwa udara segar dari luar dan udara kotor di dalam ruangan dapat bercampur dengan baik. Jika ternyata tidak maka perlu dibantu dengan fan dan memperbesar ventilasi (masukan udara segar).

***Tabel 2.3** Kebutuhan udara segar untuk pernafasan*

Aktivitas (laki-laki dewasa)	Tingkat metabolisme, M (W)	Persyaratan untuk pernafasan: Konsentrasi O_2 pada udara kotor minimal 16,3% (l/dtk)	Kebutuhan udara segar untuk menjaga kadar CO_2 dalam ruang maksimal 0,5% dengan asumsi kadar CO_2 pada udara segar minimal 0,04% (l/dtk)
Duduk santai	100	0,1	0,8
Kerja ringan	160 - 320	0,2 - 0,3	1,3 - 2,6
Kerja sedang	320 - 480	0,3 - 0,5	2,6 - 3,9
Kerja berat	480 - 650	0,5 - 0,7	3,9 - 5,3
Kerja sangat berat	650 - 800	0,7 - 0,9	5,3 - 6,4

Sumber: Awbi, 1991 (berdasarkan British Standards Institution, 1980)

Tabel 2.4 *Tingkat masukan udara luar rekomendasi ASHRAE*

Aplikasi	Perkiraan hunian maksimum (orang per 100m^2)	Kebutuhan tingkat aliran udara (l/dtk.orang)
Ruang kantor	7	10
Ruang konferensi kantor	60	10
Auditorium	150	7,5
Ruang kelas	50	7,5
Ruang makan	70	10
Ruang bar dan *cocktail*	100	15 (diperlukan pembersih udara)
Diskotek dan ruang dansa	100	12,5
Ruang merokok	70	30 (diperlukan *exhaust*)
Ruang rawat di rumah sakit	10	12,5
Toko kelontong	20 - 30	0,1 – 1,5 (l/dtk.m^2)
Rumah tinggal	-	> 7,5 (atau 0,35 ACH)

Sumber: Awbi, 1991.

2.3 Aspek Perancangan

Dalam merancang penghawaan buatan kita harus senantiasa berusaha sepenuhnya untuk mengolah seluruh potensi arsitektural bangunan agar dicapai kualitas udara dalam ruang yang sebaik-baiknya dengan energi AC yang serendah-rendahnya. Janganlah berpikir memilih AC sembarangan dengan anggapan bahwa setiap AC memiliki pengatur suhu sehingga dapat diatur sekehendak hati dan dicocok-cocokkan dengan kondisi bangunan. Jangan berpikir dari AC dulu, tetapi dari desain bangunan, walau sudah memutuskan akan memakai AC. Ketika mendesain bangunan yang akan menggunakan AC, ingatlah selalu bahwa kita akan membuat atmosfer di dalam ruangan agar sesuai dengan yang kita kehendaki, terutama untuk kesehatan dan kenyamanan. Atmosfer tersebut dapat berbeda sama sekali dengan atmosfer di luar. Yang kedua, tugas AC adalah mengangkut keluar kalor dari dalam ruangan sehingga panas yang masuk atau timbul di dalam ruang harus sesedikit-sedikitnya.

Di Indonesia, pemakaian AC secara massal baru terjadi akhir-akhir ini karena harganya relatif terjangkau. Setiap bangunan baru untuk golongan

menengah ke atas hampir selalu dilengkapi dengan AC. Sayangnya pemasangan AC tidak diimbangi dengan perilaku yang benar. Merokok di ruang ber-AC, membiarkan jendela dan pintu terbuka lebar sementara AC bekerja keras, membiarkan AC menyala ketika ruang tidak dipergunakan, adalah beberapa contoh belum sesuainya perilaku kita dengan teknologi AC.

2.3.1 Pertimbangan Desain Bangunan untuk Menghemat Energi AC

Beberapa saran di bawah ini dapat dijadikan pertimbangan dalam desain penghawaan buatan:

- Mengorientasikan bangunan ke utara-selatan guna meminimalkan penyerapan radiasi panas matahari; orientasi bangunan ke arah timur-barat (bangunan membujur utara-selatan) akan menyebabkan bidang permukaan bangunan yang terkena radiasi matahari langsung menjadi lebih luas. Panas yang diserap permukaan tadi akan merambat ke dalam dan menjadi beban bagi AC. Kalau orientasi timur-barat tidak dapat dihindari, usahakan sisi timur-barat bangunan terbayangi secara maksimal, misalnya dengan pohon yang rimbun daunnya, tritisan yang lebar, atau tirai di sebelah luar.
- Menata denah bangunan untuk melokalisasi panas dan kelembaban. Kelompokkan ruang yang menjadi sumber panas, bau dan kelembaban, terutama dapur dan kamar mandi. Berilah kipas penyedot udara (*exhaust fan*) atau cerobong asap di atas tungku sehingga asap dan udara panas dapat langsung dibuang keluar. Kamar mandi dan toilet juga perlu memakai *exhaust fan*. Ingat bahwa ruang AC tertutup sehingga bau tak-sedap bisa tinggal lebih lama.
- Membuat skala prioritas ruang yang memakai AC. Pakailah AC di ruang-ruang yang membutuhkan kenyamanan tinggi seperti ruang tidur dan ruang kerja. Ruang tidur perlu sekali nyaman agar kita dapat memperoleh tidur yang berkualitas sehingga ketika bangun akan terasa segar kembali. Sedangkan ruang kerja memerlukan kenyamanan tinggi agar kita dapat produktif. Ruang keluarga atau ruang duduk dapat juga memakai AC. Namun jika hanya untuk bersantai mungkin cukup fan saja, sama halnya dengan ruang makan dan dapur. Ruangan lain seperti garasi, gudang dan toilet tidak perlu memakai AC. Usahakanlah setidaknya ada satu ruang di rumah yang nyaman untuk beristirahat, baik ketika sakit atau kelelahan.

- Memakai bahan bangunan yang dapat menahan masuknya panas matahari ke dalam ruangan sebanyak-banyaknya; pakailah bahan bangunan yang bernilai transmitan rendah (bersifat isolator) dan bernilai refleksi tinggi (warna cerah) tanpa perlu membuat silau tetangga.
- Jangan lupa, kaca tebal (8mm) lebih baik daripada kaca tipis (4 mm), apalagi bila dari bahan kaca penahan radiasi matahari atau memakai pelapis (filem) kaca. Tapi hati-hati dalam memilih filem penahan radiasi matahari! Sekedar hitam (atau gelap) tidak menjamin suatu bahan dapat menahan radiasi matahari. Bahkan, filem hitam yang tertempel di bagian dalam kaca akan menyerap panas, menjadi panas, dan akan memancarkan panasnya ke dalam ruangan (persis seperti radiator). Jadi pasanglah filem yang berkualitas dan terbukti oleh uji lab. Hindari filem yang terlalu reflektif bila penggunaannya akan mengganggu tetangga!
- Mencegah aliran udara yang tak terkendali antara dalam dan luar ruangan; memakai jendela nako, misalnya, akan memberikan celah bagi udara luar yang hangat masuk ke dalam ruangan sementara udara dalam (yang sudah disejukkan) mengalir keluar. Akibat kebocoran ini AC terpaksa menyejukkan udara hangat dari luar terus-menerus. Lubang ventilasi dan daun pintu yang tidak menutup sempurna juga menjadi sumber kebocoran udara.
- Menyejukkan udara pada zona hunian saja; ruangan luas dan berlangit-langit tinggi memiliki volume udara besar. Kalau kita harus menyejukkan seluruh udara di dalam ruang tersebut, dari ketinggian lantai hingga langit-langit, maka AC harus bekerja lebih berat. Padahal sebenarnya yang kita perlukan hanyalah penyejukan setinggi tempat kita beraktivitas saja (*occupant's zone*, zona hunian), antara 0 - 2 meter. Dengan memanfaatkan fenomena udara sejuk berada di bawah, kita bisa mengusahakan agar udara yang kita sejukkan hanyalah setinggi ruang kita beraktivitas. Sedangkan udara di atasnya tidak perlu disejukkan karena kita tidak pernah berada di situ.
- Menghindari hambatan penyebaran udara sejuk; pada ruang kantor yang luas biasanya dibuat dinding sekat setengah tinggi. Jika AC tipe split diletakkan di satu sisi ruang, ada kemungkinan udara sejuk yang keluar dari AC akan mengumpul di ruang di dekatnya saja. Oleh karena itu dinding sekat harus diberi lubang (kisi kisi, *louvre*) di bagian bawah agar udara dapat mengalir leluasa ke ruang-ruang di antara sekat. Atau, pilihlah AC tipe kaset yang diletakkan di langit-langit agar hembusan udara sejuknya dapat menjangkau beberapa ruang di antara sekat sekaligus.
- Memilih AC yang memiliki label hemat energi dan ramah lingkungan; AC keluaran baru banyak yang dilengkapi teknologi untuk menghemat listrik. Salah satunya adalah dengan sensor gerak. Jika ruangan tidak dihuni, AC akan beroperasi dengan tenaga lebih kecil yang akan menghemat 20-30% energi listrik. Teknologi seperti itu disebut juga *inverter* yang akan menyesuaikan kapasitas pendinginan dengan memperlambat atau mempercepat kompresor, bukan menghidup-matikannya. Dengan demikian energi dapat dihemat hingga sepertiganya. (Lihat contoh di:

  `http://www.daikineurope.com/internet/denv/home.nsf).`
- Karpet dapat dipergunakan pada ruang ber-AC karena pada umumnya ruang tersebut tertutup sehingga debu dan serangga dapat dihindari. Karpet akan memberikan keleluasaan kepada kita untuk duduk di lantai dengan nyaman.
- Jangan melupakan ventilasi. Memang konsep bangunan ber-AC adalah tertutup. Tetapi udara di ruangan yang terus-menerus tertutup akan menjadi kotor (apek, berbau) oleh keringat, uap makanan, baju habis pakai dan mungkin rokok. Dalam sehari, pada saat pagi hari ketika udara luar masih segar, bukalah jendela untuk memasukkan udara segar!
- Letakkan unit luar (*outdoor unit*) jauh dari jendela ruang yang tidak memakai AC karena panas dari AC tersebut akan masuk ke ruang tersebut melalui jendela terbuka.

2.3.2 Pertimbangan Perilaku Berada di Ruang Ber-AC

- Memakai lampu-lampu yang tidak mengeluarkan terlalu banyak panas (dengan tetap mempertimbangkan estetika); lampu pijar 10 W mengeluarkan panas lebih banyak daripada lampu hemat energi 10 W (seperti CFL, *Compact Fluoresent Lamp*) yang mengeluarkan cahaya lebih terang.

- Memakai peralatan yang mengeluarkan panas sedikit; sebagai contoh monitor tabung (CRT, *Cathode Ray Tube*) mengeluarkan panas lebih banyak dibanding monitor LCD (*Liquid Crystal Display*).
- Memperlakukan khusus peralatan yang terus-menerus bekerja menghasilkan panas; sebagai contoh almari es akan selalu mengeluarkan panas di bagian belakangnya, yang berasal dari panas air yang dibekukan dan bahan-bahan lain di dalamnya. Panas ini juga akan menjadi beban AC. Oleh karena itu ada baiknya almari es ditanam di dinding dan bagian belakangnya dihubungkan dengan udara luar.
- Meletakkan AC pada tempat yang sesuai; pada AC tipe terpisah (*split*) *indoor unit* diletakkan di posisi yang tidak terhalang sehingga hembusannya merata. Sedang *outdoor unit* diletakkan di luar bangunan dan sedapat mungkin terlindung dari radiasi matahari langsung dan cukup terkena udara. Jangan meletakkan *outdoor unit* pada ruang lain atau selasar tertutup karena akan menyebabkan ruang tersebut menjadi panas. Ingat bahwa AC membuang panas dari udara dalam ruang dan kerja mesinnya sendiri! Efisiensi pembuangan panas AC akan berkurang jika *outdoor unit* berada di tempat panas.
- Memakai AC sesuai kebutuhan; memasang AC pada suhu yang sangat rendah, misalnya 16°C, akan menyebabkan AC bekerja lebih berat. Sebenarnya untuk iklim di Indonesia yang suhu udaranya relatif tinggi, antara 27-32°C, suhu di dalam ruangan 25°C pun sudah terasa nyaman. Membuat ruangan terlalu dingin selain boros energi juga tidak sehat. Jika kita seringkali keluar-masuk ruang yang memiliki selisih suhu udara di dalam dan di luar ruang lebih dari 6 derajat Celsius, kita akan mudah sakit. Selain itu adalah sia-sia jika setelah merasa dingin kita kemudian mengenakan jaket!
- Memakai pakaian ringan; memakai pakaian ringan akan memudahkan kita merasa nyaman pada suhu yang tidak terlampau rendah. Memakai jas di ruang ber-AC sebenarnya aneh, terkecuali jika kita tidak tahan udara yang sedikit rendah.
- Memilih mesin yang telah teruji memiliki tingkat hemat energi tinggi (dan ramah lingkungan); saat ini banyak AC yang diberi label hemat energi dan ramah lingkungan.
- Tidak merokok di ruang ber-AC.

- Bersihkanlah filter udara dan koil kondensor secara berkala agar penyejukan tetap efektif.
- Pakailah kipas angin untuk meratakan suhu sejuk dari AC. Terkadang AC dipasang di satu sisi ruang saja, sehingga sudut-sudut yang jauh darinya tidak terkena hembusannya. Memasang kipas angin untuk membantu pemerataan udara sejuk akan lebih hemat daripada menambah AC di sisi ruang yang lain. Selain itu, bukankah kecepatan angin dapat membantu kenyamanan termal tanpa harus membuat suhu udara lebih rendah? Kipas besar yang berputar pelahan dan tenang lebih nyaman daripada kipas angin kecil yang berputar kencang dan bising. Kipas angin besar meng-gerakkan lebih besar volume udara daripada kipas angin kecil.

2.4 Aspek Matematis

Menghitung kebutuhan penyejukan udara secara teliti amat rumit. Untunglah saat ini tersedia banyak *software* di Internet yang dapat mempercepat proses perhitungan tersebut. Sub-bab ini memberikan contoh perhitungan beban penyejukan yang dapat dimanfaatkan untuk melatih 'rasa' atau 'naluri' yang diperlukan untuk merancang penghawaan buatan.

2.4.1 Menghitung Konduktan Elemen Bangunan

Pada Bab 1 telah dijelaskan secara rinci bagaimana menghitung konduktan elemen bangunan. Di sini akan sedikit dibahas ulang cara penghitungan tersebut. Perlu diingat bahwa konduktan (k', bersatuan W/m^2degC) berbeda dengan konduktivitas (k, bersatuan W/mdegC). Konduktan untuk elemen dengan ketebalan nyata, sedangkan konduktivitas untuk elemen dengan ketebalan 1m. Konduktivitas adalah bilangan yang menunjukkan besar panas (watt) yang mengalir melalui bahan setebal 1m, seluas $1m^2$ bila perbedaan suhu kedua sisi 1 degC. Resistan (R') adalah seper konduktan, R' = 1/k'. Sedangkan Resistivitas (R) adalah seper konduktivitas, R = 1/k. Transmitan (U, bersatuan W/m^2degC) adalah konduktan yang telah memperhitungkan konduktan bahan gabungan ditambah konduktan lapisan udara di kedua permukaan elemen tadi.

Jadi untuk menghitung konduktan elemen bangunan yang merupakan gabungan dari beberapa bahan maka kita dapat memakai rumus:

$$k'_b = 1/R'_b = 1/(R'_1 + R'_2 + \dots R'_n)\ W/m^2degC$$

Jika konduktan lapisan udara di kedua sisi diperhitungkan, yang berarti kita akan menghitung transmitan (U), maka rumusnya menjadi:

$$U = 1/R'_a = 1/(1/f_o + R'_1 + R'_2 + \dots + R'_n + 1/f_i)\ W/m^2degC$$

dengan f_o = konduktan permukaan luar, W/m^2degC

f_i = konduktan permukaan dalam, W/m^2degC

R' = konduktan bahan, W/m^2degC

Tabel 2.5 *Konduktivitas dan resistivitas beberapa bahan*

Bahan	Konduktivitas, k (W/mdegC)	Resistivitas, R (1/k) (W/mdegC)
Asbes: lepas-lepas	0,034	29,40
Asbes: disemprot	0,046	21,75
Lembaran semen asbes: ringan	0,216	4,63
Lembaran semen asbes: sedang	0,360	2,78
Lembaran semen asbes: padat	0,576	1,74
Aspal	0,576	1,74
Batu bata biasa: ringan	0,806	1,24
Batu bata biasa: sedang	1,210	0,83
Batu bata biasa: padat	1,470	0,68
Plester	0,90	1,11
Beton	1,440	0,69
Glass wool	0,034	29,40
Mineral wool	0,037	27,00
Papan gypsum	0,159	6,33
Plywood	0,138	7,25
Batu granit	2,920	0,34
Papan dari jerami	0,093	10,75
Softboard	0,065	15,38
Kayu: lunak	0,138	7,25
Kayu: keras	0,160	6,25
Logam: timah	34	0,0294
Logam: besi tuang	50	0,0200
Logam: baja	58	0,0172
Logam: perunggu	64	0,0156
Logam: seng	110	0,0091
Logam: aluminium	220	0,0045
Logam: tembaga	350	0,0029
Logam: perak	407	0,0024
Udara	0,026	38,45
Air	0,580	1,72

Sumber: Koenigsberger, 1973.

2.4.2 Menghitung Kebutuhan Penyejukan dengan Metode Keseimbangan Termal

Telah disebutkan di atas bahwa secara sederhana tugas AC adalah membuang kelebihan kalor dari dalam ruang keluar ruang agar jumlah kalor di dalam ruang tidak berlebih, tidak menyebabkan suhu udara naik di atas batas kenyamanan termal. Metode keseimbangan termal ini menggunakan asumsi bahwa keadaan pada saat perhitungan adalah statis (tidak melibatkan dimensi waktu yang memberikan efek dinamis). Sebagai contoh, dalam perhitungan dengan metode ini matahari dianggap statis (tetap) pada satu posisi dan memberi kesempatan panas untuk merambat dari sisi luar dinding (atau atap) ke sisi dalam dinding. Pada keadaan yang sebenarnya, perambatan panas melalui dinding tersebut memerlukan waktu beberapa saat. Padahal matahari akan terus bergerak sehingga mungkin saja sebelum dinding menjadi panas matahari sudah bergeser, dan dinding terlindungi oleh tritisan. Pada umumnya waktu yang diperlukan bagi panas untuk merambat tergantung pada sifat bahan yang digunakan.

Keseimbangan termal di dalam bangunan dapat diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$Q_i + Q_s \pm Q_c \pm Q_v \pm Q_m - Q_e = 0$$

Q_i = *internal heat gain* (panas dari sumber di dalam ruangan), W

Q_s = *solar heat flow* (panas matahari yang menembus kaca atau melalui jendela),W

Q_c = *conduction heat flow* (panas dari ruang luar yang menembus dinding), W

Q_v = *convection heat flow* (panas dari udara luar), W

Q_m = *mechanical cooling* (panas yang harus diangkut oleh mesin penyejuk udara), W

Q_e *evaporation* (pengurangan panas karena penguapan), W

Bila hasilnya + berarti ruangan akan menjadi panas, bila – berarti akan mendingin.

Untuk daerah tropis, keseimbangan termal menjadi:

$$\mathbf{Q_i + Q_s + Q_c + Q_v - Q_m = 0}$$

dan untuk memperkirakan beban penyejuk udara, rumusnya adalah:

$$\mathbf{Q_m = Q_i + Q_s + Q_c + Q_v}$$

$$\mathbf{Q_i = \Sigma \text{ panas (manusia, peralatan rumah tangga)}}$$

$$\mathbf{Q_s = A.I.\theta}$$

A = luas jendela, m^2
I = intensitas radiasi matahari, W/m^2
θ = *solar gain factor* bahan kaca

$$\mathbf{Q_c = A.U.\Delta T}$$

A = luas dinding, m^2
U = nilai transmitan, W/m^2degC
ΔT = selisih suhu, degC

$$\mathbf{Q_v = 1300.V.\ \Delta T}$$

1300 = panas jenis udara, J/m^3degC
V = kecepatan ventilasi, m^3/s
ΔT = perbedaan suhu, degC

$$\mathbf{T_s = T_o + (I.cos\beta.\alpha/\ f_o)}$$

T_s = suhu permukaan yang terkena matahari langsung, degC
T_o = suhu ruang luar, degC
I = intensitas radiasi matahari, W/m^2
α = bilangan serap permukaan dinding
β = sudut datang radiasi matahari, sudut antara garis normal bidang dan garis ke matahari
f_o = konduktan permukaan luar yang terkena radiasi matahari, W/m^2 degC

2.4.3 Menghitung OTTV

OTTV (*Overall Thermal Transfer Value*, Harga Perpindahan Termal Menyeluruh) adalah angka yang menunjukkan perolehan panas akibat radiasi matahari yang melewati per meter persegi luas selubung bangunan. OTTV diperlukan sebagai pedoman perancangan agar diperoleh desain yang hemat energi. Semakin kecil OTTV, semakin kecil panas matahari yang masuk ke dalam bangunan dan menjadi beban penyejukan (*cooling load*) sehingga kerja AC semakin ringan. Itu juga berarti energi yang diperlukan untuk menyejukkan bangunan menjadi semakin kecil. Setiap negara memberikan standar sendiri. Di Indonesia, berdasarkan Standar Tata Cara Perancangan Konservasi Energi pada Bangunan Gedung yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum, OTTV untuk dinding luar bangunan tidak boleh lebih dari 45 W/m^2. Di Hongkong standar OTTV adalah 35 W/m^2 untuk menara.

Rumus untuk menghitung OTTV dinding dengan orientasi tertentu:

$$\mathbf{OTTV_n = \alpha\ \{U(\ 1\text{-}WWR)\}.\Delta T_{eq} + (SC)(WWR)(SF)\ W/m^2}$$

dengan

$OTTV_n$ = harga perpindahan panas menyeluruh pada dinding luar yang memiliki orientasi tertentu, W/m^2.
α = absorpsi radiasi matahari permukaan dinding (Lihat Tabel 2.6)
U = transmitan dinding, W/m^2degC (Lihat Tabel 2.7)
WWR = *window-to-wall ratio* atau perbandingan antara luas jendela dan luas seluruh permukaan dinding luar pada orientasi yang sama.
ΔT_{eq} = perbedaan suhu ekivalen antara sisi luar dan dalam (Lihat Tabel 2.8).
SF = *solar factor* atau faktor radiasi matahari, W/m^2.
SC = *shading coefficient* atau koefisien peneduh sistem fenestrasi (bukaan).

Untuk menghitung OTTV rata-rata seluruh dinding luar dipergunakan rumus:

$$OTTV = \{(A_1)(OTTV_1) + (A_2)(OTTV_2) + \ldots (A_n)(OTTV_n)\}/(A_1 + A_2 + .. A_n)\ W/m^2$$

dengan OTTV = harga perpindahan panas seluruh dinding luar, W/m^2.
$OTTV_n$ = harga OTTV pada dinding luar n, W/m^2.
A_n luas total dinding luar n termasuk jendela, m^2.

Tabel 2.6 Absorpsi radiasi matahari permukaan dinding

Bahan Dinding Luar	α_w	Cat Dinding Luar	α_p
Beton berat (untuk bangunan nuklir)	0,91	Hitam merata	0,95
Bata merah	0,89	Pernis hitam	0,92
Bitumen lembaran	0,88	Abu-abu tua	0,91
Batu sabak	0,87	Pernis biru tua	0,91
Beton ringan	0,86	Cat minyak hitam	0,90
Aspal jalan setapak	0,82	Coklat tua	0,88
Kayu permukaan halus	0,78	Abu-abu biru tua	0,88
Beton ekspos	0,61	Biru/hijau tua	0,88
Ubin putih	0,58	Coklat medium	0,84
Bata kuning tua	0,56	Pernis hijau	0,79
Atap putih	0,50	Hijau medium	0,59
Cat aluminium	0,40	Kuning medium	0,58
Kerikil	0,29	Hijau/biru medium	0,57
Seng putih	0,26	Hijau muda	0,47
Bata glasir putih	0,25	Putih agak mengilap	0,30
Almunium lembaran mengilap	0,12	Putih mengilap	0,25
		Perak	0,25
		Pernis putih	0,21

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum

Absorbsi permukaan yang dicat adalah rata-rata dari absorpsi bahan dinding dan absorpsi cat:

$$\alpha = (\alpha_w + \alpha_p)/2$$

Dinding bata merah ($\alpha_w = 0,89$) bila dicat warna putih mengilap ($\alpha_p = 0,25$) akan menghasilkan

$$\alpha = (\alpha_w + \alpha_p)/2$$
$$= (0,89+0,25)/2$$
$$= 0,57$$

Itu bermakna bahwa permukaan yang menyerap banyak radiasi panas dapat dikurangi dengan mengecatnya menggunakan warna terang.

Tabel 2.7 Nilai transmitan beberapa tipe konstruksi

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Dinding	
Batu bata, tidak diplester, tebal 114 mm	3,64
Batu bata, diplester kedua sisinya, tebal 114 mm	3,24
Batu bata, tidak diplester, tebal 228 mm	2,67
Batu bata, diplester kedua sisinya, tebal 228 mm	2,44

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Beton padat biasa, tebal 152 mm	3,58
Beton padat biasa, tebal 203 mm	3,18
Batu berkepadatan sedang, berpori, tebal 305 mm	2,84
Batu berkepadatan sedang, berpori, tebal 457 mm	2,27
Batu bata berongga sejarak 280 mm, bagian luar bata fletton, bagian dalam bata biasa, dan sisi yang menghadap ruang dalam diplester	1,70
Batu bata dengan isolator papan gabus setebal 25 mm, diplester	0,85
Batu bata dengan isolator *fibreboard* setebal 13 mm, diplester	1,19
Batu bata dengan isolator sleb serutan kayu setebal 50 mm, diplester	0,85
Batu bata dengan bagian dalam diplester vermikulit setebal 16 mm.	1,47
Batu bata, sisi dalam dilapis papan asbes 13 mm dengan rangka kayu	1,19
Batu bata, sisi dalam dilapis papan serat 13 mm dengan rangka kayu	0,95
Batu bata, sisi dalam dilapis papan jerami 50 mm dengan rangka kayu, diplester	0,74
Batu bata, sisi dalam dilapis *aerated concrete blocks* setebal 100 mm	1,13
Batu bata, sisi dalam dilapis *clinker concrete blocks* setebal 100 mm	1,30
Aerated concrete block ganda (bercelah), tebal 250 mm (100+50+100), bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,19
Clinker concrete block ganda (bercelah), tebal 250 mm (100+50+100), bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,08
Aerated concrete block berongga, tebal 228 mm, satu lapis, bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,70
Clinker concrete block berongga, tebal 228 mm, satu lapis, bagian luar dicat, bagian dalam diplester	1,59
Asbes semen gelombang pada rangka	6,53
Asbes semen gelombang pada rangka baja dengan *fibreboard* 13 mm	2,04
Asbes semen gelombang pada rangka baja dengan lapisan jerami atau serutan kayu 50 mm	1,19
Asbes semen gelombang pada rangka baja dengan *aerated concrete block* 76 mm	2,10
Atap Miring	
Asbes semen gelombang	7,95
Asbes semen gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm. (Asbes semen diletakkan pada gording, sedangkan *fibreboard* ditempelkan bagian bawah rangka)	1,70
Asbes semen gelombang dilapis dengan *fibreglass* setebal 25 mm.	0,80
Asbes semen gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm yang dipasang pada rangka kayu. Di atas *fibreboard* ditempelkan aluminium foil.	1,20
Asbes semen gelombang, langit-langit dari papan kayu setebal 13 mm yang dipasang pada rangka kayu. Di atas papan kayu ditempelkan aluminium foil.	1,60

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Asbes semen gelombang, langit-langit dari asbes semen setebal 5 mm yang dipasang pada rangka kayu. Di atas asbes semen ditempelkan aluminium foil.	1,70
Asbes semen gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm, di atas *fibreboard* diberi *fibreglass* 25 mm, dan di atas *fibreglass* ditempel *alumunium foil.*	0,68
Asbes semen gelombang, langit-langit dari papan kayu setebal 13 mm, di atas papan kayu diberi *fibreglass* 25 mm, dan di atas *fibreglass* ditempel *alumunium foil.*	0,74
Asbes semen gelombang, langit-langit dari asbes semen setebal 5 mm, di atas asbes semen diberi *fibreglass* 25 mm, dan di atas *fibreglass* ditempel *alumunium foil.*	0,80
Aluminium gelombang, langit-langit dari *fibreboard* setebal 13 mm.	1,30
Aluminium gelombang, langit-langit dari asbes semen setebal 5 mm.	1,90
Aluminium gelombang, langit-langit dari papan jerami setebal 50 mm.	1,08
Aluminium gelombang, langit-langit dari sleb serutan kayu setebal 25 mm.	1,42
Aluminium gelombang, langit-langit dari papan gipsum 10 mm.	1,88
Aluminium gelombang, langit-langit dari sleb gabus setebal 25 mm.	1,27
Asbes gelombang dengan lapisan papan kayu setebal 13 mm.	2,16
Asbes gelombang dengan lapisan jerami atau serutan kayu setebal 50 mm.	1,25
Asbes gelombang dengan lapisan kapas setebal 25 mm pada papan setebal 13 mm.	0,85
Baja lapis seng gelombang pada rangka kayu.	8,52
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit *fibreboard* 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar.	1,30
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit papan kayu 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar.	1,60
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit asbes semen 5 mm yang dipasang pada ikatan mendatar.	1,90
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit *fibreboard* 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar. Di atas *fribreboard* ditempelkan *aluminium foil.*	1,00
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit papan kayu 13 mm yang dipasang pada ikatan mendatar. Di atas papan kayu ditempelkan *aluminium foil.*	1,30
Baja lapis seng gelombang pada gording, ditambah langit-langit asbes semen 5 mm yang dipasang pada ikatan mendatar. Di atas asbes semen ditempelkan *aluminium foil.*	1,40
Genteng tanah liat dengan langit-langit *fibreboard* 13 mm yang di atasnya dilapis *fibreglass* 25 mm. Di atas *fibreglass* ditempelkan *aluminium foil.*	0,62

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Genteng tanah liat dengan langit-langit papan kayu 13 mm yang di atasnya dilapis *fibreglass* 25 mm. Di atas papan kayu ditempelkan *aluminium foil.*	0,74
Genteng tanah liat dengan langit-langit asbes semen 5 mm yang di atasnya dilapis *fibreglass* 25 mm. Di atas asbes semen ditempelkan *aluminium foil.*	0,80
Seng gelombang pada rangka kayu ditambah langit-langit gipsum.	3,18
Genteng atau lempengan batu pada papan ditambah lapisan bulu kempa dan langit-langit gipsum.	1,70
Dek aluminium, *fibreboard* 13 mm dengan dua lapis bulu kempa bitumen.	2,16
Dek aluminium, lapisan jerami atau serutan kayu setebal 50 mm.	1,25
Atap Datar	
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, di atas *screed* ditambah tiga lapis bulu kempa bitumen	3,35
Beton bertulang setebal 100 mm, di atasnya *screed* setebal 75 mm. Langit-langit dari *fibreboard* 13 mm yang ditempelkan pada rangka kayu di bawah beton.	1,30
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, ditambah lagi isolator dari gabus setebal 25 mm, plus tiga lapis bulu kempa bitumen	1,08
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, ditambah lapisan jerami atau serutan kayu sebagai isolator setebal 50 mm, plus tiga lapis bulu kempa bitumen	1,13
Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, ditambah dua *fibreboard* masing-masing 12 mm sebagai isolator, plus tiga lapis bulu kempa bitumen.	1,25
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum	1,82
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum, di atas papan dilapisi isolator gabus setebal 25 mm.	0,85
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum, di atas papan dilapisi isolator *fibreboard* setebal 13 mm.	1,25
Papan kayu setebal 25 mm pada balok 178mm dengan tiga lapis bulu kempa bitumen dan langit-langit gipsum, di atas papan dilapisi isolator jerami atau serutan kayu setebal 50 mm.	0,91
Lantai	
Beton di atas tanah atau lapisan padat.	1,13
Beton di atas tanah atau lapisan padat, plus granit, teraso atau kepingan lain.	1,13

Tipe Konstruksi	Transmitan, U (W/m^2degC)
Beton di atas tanah atau lapisan padat, plus blok kayu.	0,85
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai berventilasi.	1,70
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi dari satu sisi, di atas papan di lapis parket, lino, atau karet.	1,42
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi.	2,27
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di atas papan di lapis parket, lino, atau karet.	1,98
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, bagian bawah papan dilapis *fibreboard* 25 mm.	1,08
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, bagian bawah papan dilapis papan gabus 25 mm.	0,95
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di bawah balok kayu dipasang papan gabus 25 mm.	0,79
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di bawah balok kayu dipasang papan jerami 50 mm.	0,85
Papan kayu di atas balok kayu, ruang di bawah lantai diberi ventilasi lebih dari satu sisi, di bawah digantungkan *aluminium foil* dua sisi.	1,42

Sumber: Koenigsberger, 1973.

Tabel 2.8 *Beda suhu ekivalen untuk dinding (ΔT_{eq})*

Konstruksi Dinding	Berat/Satuan Luas (kg/m^2)	ΔT_{eq} (K)
Ringan	< 125	15
Sedang	126 – 195	12
Berat	> 195	10

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum

Untuk dinding yang terdiri atas susunan beberapa komponen (material) berbeda, kita dengan mudah dapat menghitung berat/satuan luasnya dengan menghitung berapa berat setiap komponen per satuan luas dan kemudian dijumlahkan. Untuk itu diperlukan data berat jenis masing-masing komponen.

Untuk atap kita memakai istilah **RTTV** (*Roof Thermal Transfer Value*)

$$\mathbf{RTTV = \{(A_r)(U_r)(\Delta T_{eq})+(A_s)(U_s)(\Delta T)+(A_s)(SC)(SF)\}/(A_r+A_s)\ W/m^2}$$

Jika atap terdiri atas banyak bidang, misalnya dengan sudut yang berbeda-beda, maka $RTTV_{rata\text{-}rata}$ dicari dengan menjumlahkan seluruh RTTV masing-masing bagian atap dibagi jumlah luas bagian atap tadi (Persis seperti mencari $OTTV_{rata\text{-}rata}$) dengan

RTTV = harga perpindahan termal menyeluruh atap, W/m^2
A_r = luas atap yang tak tembus cahaya, m^2
U_r = transmitan atap yang tak-tembus cahaya, W/mdegC
ΔT_{eq} = beda suhu ekivalen, degC (atau K)
A_s = luas lubang cahaya atap, m^2
U_s = transmitan lubang atap, W/mdegC
ΔT = beda suhu antara kondisi perencanaan luar dan dalam, 5 degC
SC = koefisien peneduh (*shading coefficient*) lubang cahaya atap

Tabel 2.9 *Beda suhu ekivalen untuk atap (ΔT_{eq})*

Konstruksi Atap	Berat/Satuan Luas (kg/m^2)	ΔT_{eq} (K)
Ringan	< 50	24
Sedang	50 – 230	20
Berat	> 230	16

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum

Tabel 2.10 *Faktor radiasi matahari (Solar Factor, SF, W/m^2) untuk Jakarta*

Orientasi	Utara	Timur Laut	Timur	Tenggara	Selatan	Barat Daya	Barat	Barat Laut
SF	130	113	112	97	97	176	243	211

Rata-rata untuk seluruh orientasi **dinding** **SF = 147 W/m^2**, sedang untuk atap **SF = 316 W/m^2**.
Sumber: Departemem Pekerjaan Umum

Data lain yang diperlukan untuk menghitung OTTV adalah SC (*Shading Coefficient*) atau Koefisien Peneduh Penestrasi (bukaan/jendela berkaca) yang biasanya diberikan oleh pabrik pembuat jendela tersebut. Koefisien Peneduh Penestrasi adalah perbandingan antara perolehan panas radiasi matahari yang melalui suatu tipe kaca tertentu dan yang melalui kaca bening pada kondisi yang sama. Atau *download freeware* Window5.2 dari

`http://windows.lbl.gov/software/window/window.html.`

2.5 Contoh Perhitungan

Pada bagian ini akan diberikan berbagai contoh perhitungan, yaitu menghitung konduktan elemen bangunan dan menghitung kebutuhan penyejukan dengan metode keseimbangan termal.

2.5.1 Menghitung Konduktan Elemen Bangunan

Soal: Hitunglah konduktan dinding yang tersusun dari granit setebal 2 cm, batu bata sedang setebal 12cm dan kayu lunak setebal 3cm.

Jawab:

Sesuai 2.4.1 maka:
$R_{batu\ granit} = 0{,}34$ mdegC/W sehingga
$R'_{batu\ granit} = (2/100)(0{,}34)\ m^2degC/W = 0{,}0068\ m^2degC/W.$

$R_{batu\ bata\ sedang} = 0{,}83$ mdegC/W sehingga
$R'_{batu\ bata\ sedang} = (12/100)(0{,}83)\ m^2degC/W = 0{,}0996\ m^2degC/W.$

$R_{kayu\ lunak} = 7{,}25$ mdegC/W sehingga
$R'_{kayu\ lunak} = (3/100)(7{,}25)\ m^2degC/W = 0{,}2175\ m^2degC/W.$

Jadi konduktan elemen bangunan:

$$k'_{elemen} = 1/(R'_{batu\ granit} + R'_{batu\ bata\ sedang} + R'_{kayu\ lunak})$$
$$= 1/(0{,}0068 + 0{,}0996 + 0{,}2175)$$
$$= 1/0{,}3239$$
$$= 3{,}087\ W/m^2degC.$$

2.5.2 Menghitung Kebutuhan Penyejukan dengan Metode Keseimbangan Termal

Soal: Sebuah ruang kantor berukuran lebar 5m, panjang 5m dan tinggi 2,5m terletak di gedung perkantoran berlantai banyak akan dikondisikan secara lokal; tidak memakai AC terpusat, tetapi memakai AC tipe split. Untuk menjaga kesegaran ruang, mengingat AC tipe split tidak dilengkapi dengan sarana pemasukan udara segar dari luar, dipasang dua fan kecil menembus dinding yang masing-masing berlaku sebagai *inhaust fan* (memasukkan udara bersih dari luar) dan *exhaust fan* (mengeluarkan udara kotor dari dalam ruang). Kecepatan kedua fan tersebut dapat diatur. Dinding utara berhubungan langsung dengan ruang luar, terdiri atas dinding batu bata setebal 114mm yang diplester di kedua sisinya ($U_{dinding} = 3{,}24\ W/m^2degC$, $\alpha = 0{,}86$), dicat warna kuning medium ($\alpha = 0{,}58$). Bagian dinding bata merah berukuran lebar 5m dan tinggi 1m. Di atas dinding bata merah ada jendela kaca berukuran lebar 5m dan tinggi 1,5m. Menurut brosur pabriknya, kaca tersebut mempunyai $U_{kaca} = 4{,}48\ W/m^2degC$. Pada saat perhitungan, sudut datang matahari pada dinding dan kaca, β, adalah 60^o. Ternyata untuk sudut datang itu, kaca mempunyai $\theta = 0{,}75$.

Data yang tersedia:

Radiasi matahari rata-rata (I) = 600 W/m^2.
Transmitan lapisan udara luar (f_o) = 10 W/m^2degC.
Panas jenis udara = 1300 J/m^3degC.
Ventilasi = 3 ACH (*Air Change per Hour*, pergantian udara per jam).
Suhu di dalam bangunan (T_i) diusahakan tetap 24°C.
Suhu ruang luar (T_o) diukur 30°C.

Bangunan berisi 6 orang tenaga administrasi dengan memakai 4 lampu (@ 100W). Setiap orang diperkirakan mengeluarkan panas 140W.

Ruang-ruang yang berbatasan dengan ruang tersebut juga dikondisikan hingga suhu udaranya 24°C juga (Jadi dalam keadaan seimbang, sama-sama 24°C, tidak ada aliran panas di dinding yang membatasi ruang kita dengan ruang lain.

1. Hitunglah beban penyejukan yang diperlukan! Berapa biaya pemakaian listrik untuk AC per jamnya?
2. Carilah cara-cara untuk menekan beban penyejukan di atas! Berapa biaya pemakaian listrik untuk AC per jamnya setelah diadakan perubahan.
3. Seandainya kondisi seperti soal a berlangsung selama 1 jam saja setiap hari, bandingkanlah penghematan uang yang dapat Anda lakukan selama 25 hari kerja bila saran jawaban soal b diterapkan, dengan asumsi biaya pemakaian listrik Rp 400,00/kWh. Mengapa kita asumsikan di sini? Karena matahari bergerak bukan? Sehingga β berubah terus-menerus dari mulai saat terbit hingga terbenam, sehingga kalau kita mau teliti maka pergantian posisi ini harus dihitung secara dinamis. Selain itu dinding yang terkena panas tidak akan serta merta menjadi panas dan seketika melepaskan panas dari sisi dalamnya ke udara di dalam ruangan. Dibutuhkan waktu bagi dinding untuk bertambah panas dan merambatkan panasnya dari sisi luar ke sisi dalam. Semakin tebal dinding, semakin lama waktu yang diperlukan!

Jawaban soal a:

Ingat rumus $\mathbf{Q_m = Q_i + Q_s + Q_c + Q_v}$

$$\Delta T_{kaca} = T_o - T_i$$
$$30 \quad 24$$
$$6\ degC$$

$\Delta T_{dinding}$ perlu dihitung tersendiri karena permukaan luar dinding yang terkena radiasi matahari langsung akan menyerap panas dan suhunya naik. Permukaan luar kaca sebenarnya juga akan menjadi panas tetapi karena kenaikannya kecil maka dapat diabaikan.

Absorpsi dinding luar adalah rata-rata dari absorbsi bata diplester dan dicat:

$$\alpha = 0{,}5(\alpha_{dinding} + \alpha_{cat})$$
$$= 0{,}5\ (0{,}86 + 0{,}58)$$
$$= 0{,}5\ (1{,}44)$$
$$= 0{,}72$$

Suhu permukaan luar dinding

$$T_s = T_o + (I.\alpha.\cos\beta\ /f_o)$$
$$= 30 + (600)(0{,}72)(\cos 60)/(10)$$
$$= 30 + (600)(0{,}72)(0{,}5)/10$$
$$= 30 + 21{,}6$$
$$= 51{,}6\ ^\circ C$$

Maka $\Delta T_{dinding} = 51{,}6 - 24$
$= 27{,}6\ ^\circ C$

Q_i = Σ panas (manusia, peralatan rumah tangga)
= panas lampu + panas manusia
= (4)(100) + (6)(140)
= 400 + 840
= 1240 W

Q_s = panas matahari yang menembus kaca
$= A_{kaca}.I.\theta$
= (5)(1,5)(600)(0,75)
= 3375 W

Q_c = panas melalui dinding + panas melalui kaca
$= A_{dinding}.U_{dinding}.\Delta T + A_{kaca}.U_{kaca}.\Delta T$
= (5)(1)(3,24)(27,6) + (5)(1,5)(4,48)(6)
= 447,12 + 201,6
= 648,72 W

Q_v = panas karena ventilasi
$= 1300.V.\ \Delta T$
= (1300)(0,052)(6)
= 405,6 W

Bilangan 0,052 diperoleh dari (volume ruangan)(ACH)/3600 dtk
= (5)(5)(2,5)(3)/3600
= 0,052 m^3/dtk

$Q_m = Q_i + Q_s + Q_c + Q_v$
$= 1240 + 3375 + 648{,}72 + 405{,}6$
= 5669,32 W ~ 5,67kW
(beban penyejukan/pendinginan)

Carilah pada brosur AC kolom kapasitas penyejukan atau pendinginan (*cooling load*) dan temukan ukuran AC yang cocok (lihat ***Gambar 2.8***). Jangan keliru dengan daya listrik yang dibutuhkan AC tersebut (*power input*). Pada contoh kita punya dua pilihan yang dekat dengan kebutuhan 5,67 kW, yaitu kapasitas pendinginan 5,40 kW (memerlukan daya listrik 1,68 kW, model CS-C18BKN) dan 7,03 kW (memerlukan daya listrik 2,35 kW, model CS-C24BKN). Pilihan pertama mempunyai kapasitas yang sedikit lebih rendah dari kapasitas yang diperlukan. Kita dapat mempertimbangkan apakah kondisi seperti dalam soal berlangsung sepanjang hari dan merupakan puncak beban pendinginan terbesar. Jika ya, maka kita dapat berasumsi bahwa pada saat lain, beban penyejukan lebih kecil dari kondisi tersebut (misalnya karena matahari telah bergeser dan tidak masuk ke dalam ruangan). Oleh karena itu kita dapat mengambil pilihan pertama (AC split, dengan kapasitas pendinginan 5,40 kW) tanpa khawatir suhu ruangan tidak nyaman. Memilih yang kedua akan sangat boros, walau lebih memberikan kepastian bahwa ruang dapat selalu sejuk (asal keadaan yang jauh lebih panas dari kondisi pada soal di atas tidak terjadi).

Dengan memilih AC split berkapasitas pendinginan 5,40 kW maka diperlukan daya listrik 1,68 kW. Setiap jamnya diperlukan daya listrik 1,68 kWh. Bila biaya pemakaian listrik Rp 400,00/kWh maka uang yang harus dikeluarkan untuk AC per jamnya = (1,68kWh)(Rp 400,-/kWh) = **Rp 672,00**

Tipe Split Tunggal

Model	Kapasitas Pendinginan		EER		Data Listrik			Laju Pengembunan	Sirkulasi Udara (Ruangan/Hi)	Dimensi Kabinet (Unit Luar)			Berat Bersih	Pipa Refrigeran Diameter mm (inch)	
	Btu/j	kW	Btu/W	Tegangan V	Daya Listrik kW	Arus Kerja A		lj	m³/min	Tinggi mm	Lebar mm	Tebal mm	kg	Bagian Gas	Bagian Cair
CS-C7BKN (CU-C7BKN5)	6.820	2.00	12,4	220	0.65	2.7		1.3	8.5	275 (540)	799 (780)	210 (289)	9.0 (28)	6.35 (1/4)	9.52 (3/8)
CS-C9BKN (CU-C9BKN5)	9.040	2.65	12.2	220	0.74	3.5		1.6	9.9	275 (540)	799 (780)	210 (289)	9.0 (31)	6.35 (1/4)	9.52 (3/8)
CS-C12BKN (CU-C12BKN5)	12.300	3.60	11,1	220	1.11	5.1		2.1	10.2	275 (540)	799 (780)	210 (289)	9.0 (35)	6.35 (1/4)	12.70 (1/2)
CS-C18BKN (CU-C18BKN5)	18.400	5.40	10.95	220	1.68	7.8		2.9	14.9	275 (685)	998 (800)	210 (300)	11.0 (55)	6.35 (1/4)	12.70 (1/2)
CS-C24BKN (CU-C24BKN5)	24.000	7.03	10.21	220	2.35	11.5		4.0	16.9	275 (685)	998 (800)	210 (300)	11.0 (60.0)	6.35 (1/4)	15.88 (5/8)
CS-C56KJ (CU-C56KJ)	5.000	1.50	12.65	220	0.39	1.9		1.0	4.4	290 (480)	790 (780)	152 (245)	8.0 (26)	6.35 (1/4)	9.52 (3/8)
CS-C76KJ (CU-C76KJ)	7.000	2.05	12.3	220	0.57	2.8		1.3	6.4	290 (480)	790 (780)	152 (245)	8.0 (26)	6.35 (1/4)	9.52 (3/8)
CS-C96KJ (CU-C96KJ)	9.000	2.60	10.7	220	0.84	4.0		1.6	7.3	290 (480)	790 (780)	152 (245)	8.0 (29)	6.35 (1/4)	9.52 (3/8)

Gambar 2.8 *Contoh spesifikasi AC tipe split tunggal dari National*

Jawaban soal b:

Jika kita perhatikan jawaban soal a di atas, kita segera tahu bahwa panas yang masuk ke ruang tersebut, yang menjadi beban penyejukan, sangatlah besar. Untuk itu perlu usaha agar beban dapat diminimalkan. Beberapa langkah yang dapat kita tempuh adalah sebagai berikut:

- Adakah beban panas yang bisa dihilangkan?
- Adakah beban panas yang bisa dikurangi?
- Apakah selisih suhu antara ruang dalam dan luar (ΔT) dapat dikecilkan?
- Apakah ACH dapat dikecilkan?
- Apakah perambatan panas pada dinding dapat dikurangi?
- Apakah penyerapan panas pada dinding dapat dikurangi?

1. Menghilangkan beban panas. Pada jawaban soal a terlihat tambahan panas yang paling besar adalah dari radiasi matahari yang langsung masuk ke dalam ruangan. Jika saja kita dapat mencegat radiasi itu maka kita dapat mengurangi beban sebanyak 3375 W! Salah satu cara untuk itu adalah dengan memberi tritisan yang cukup lebar. Cara lain adalah dengan memasang tirai di sisi luar kaca. Namun tirai sering dianggap menghalangi pandangan. Memakai kaca khusus penangkal radiasi matahari dapat juga menjadi pertimbangan, walau cara ini tidak dapat 100% menghalagi panas. Ingat bahwa pemasangan tirai di sisi dalam kaca tidak bermanfaat mengurangi panas karena panas akan diserap oleh tirai yang menyebabkan suhu tirai naik dan melepaskan panasnya ke udara di dalam ruangan. Tirai di sisi dalam akan berlaku sebagai radiator.
2. Mengurangi beban panas. Banyak cara untuk mengurangi beban panas, antara lain dengan memakai lampu hemat energi yang melepaskan panas lebih sedikit.
3. Mengurangi selisih suhu antara udara luar dan udara dalam. Telah kita bahas di depan bahwa membuat suhu udara di dalam ruangan terlalu rendah tidak hanya boros energi, tetapi juga tidak sehat. Untuk di Indonesia, suhu udara 25°C sudah cukup nyaman. Walau hanya berselisih 1 degC saja, jika diakumulasikan maka penghematan yang dilakukan akan besar juga.

MILIK
Badan Perpustakaan

4. Mengurangi ACH. Pergantian udara segar per jam dimaksudkan untuk menjaga agar udara ruang selalu sehat dan nyaman. Udara segar dari luar yang mempunyai suhu lebih tinggi dari suhu udara dalam ruang akan membawa panas. Ini akan menjadi beban. Jika di dalam ruangan tersebut ada sumber polusi seperti rokok, sampah, kompor, dan mesin fotokopi, maka pergantian udara harus dibuat tinggi. Jika polusi tidak dibuang, penghuni dapat keracunan. Sebaliknya, bila tidak ada sumber polusi lain selain nafas manusia, kita dapat mengecilkan pergantian udara segar tadi.
5. Mengurangi perambatan panas. Perambatan panas dapat dikurangi dengan mengganti material dengan material lain yang memiliki nilai transmitan lebih kecil, U, atau menambahkan lapisan lain pada dinding agar U bertambah kecil.
6. Mengurangi penyerapan panas. Untuk mengurangi penyerapan panas dapat dilakukan dengan cara, salah satunya, mengecat dinding dengan warna yang lebih cerah.

Mari kita coba kiat seperti yang tertulis pada butir-butir di atas dan kita susun kembali sebagai berikut:

- Memasang tritisan untuk melindungi jendela kaca dari radiasi langsung matahari.
- Mengganti 4 lampu @100 watt dengan 4 lampu CFL (*Compact Fluorescent Lamp*) hemat energi @ 24 watt (diasumsikan setiap lampu tersebut mengeluarkan panas 24 watt juga; ingat ada perbedaan pengertian antara watt daya dan watt panas).
- Suhu udara di dalam ruangan (dan ruang-ruang di sekelilingnya) kita naikkan sedikit menjadi 25°C.
- Karena di ruangan tersebut tidak ada sumber polusi selain dari nafas manusia, maka kita turunkan ACH menjadi 0,5. Jika volume ruang (5mx5mx2,5m) = 62,5m^3 berarti setiap jamnya cukup setengah udara dalam ruangan tersebut yang akan diganti, yaitu sebesar 31,25m^3 udara, atau (31,25m^3) /(3600dtk) = 0,0087m^3/dtk. Itu menjadi tugas kedua fan tadi. Jika fan berpenampang (20cmx20cm) = 400cm^2 = 0,04m^2 maka kecepatan udara pada fan adalah (0,0087m^3/dtk)/(0,04m^2) = 0,217m/dtk. Fan hanya cukup berputar pelan saja sehingga tidak berisik.

- Bagian dalam dinding batu bata kita lapisi papan gabus setebal 25mm. Ini akan menjadikan $U_{dinding}$ = 0,85 W/m^{2}degC.
- Cat dinding luar perlu kita ganti dengan yang lebih cerah agar penyerapannya berkurang. Kita coba dengan warna putih agak mengilap, α_{cat} = 0,30.

Dari strategi di atas kita hitung lagi dengan langkah seperti menjawab soal a.

Ingat rumus $Q_m = Q_i + Q_s + Q_c + Q_v$

$$\Delta T_{kaca} = T_o - T_i$$
$$= 30 - 25$$
$$= 5 \text{ degC}$$

Absorpsi dinding luar adalah rata-rata dari absorbsi bata diplester dan cat:

$$\alpha = 0{,}5(\alpha_{dinding} + \alpha_{cat})$$
$$= 0{,}5\ (0{,}86 + 0{,}30)$$
$$= 0{,}5\ (1{,}44)$$
$$= 0{,}72$$

Suhu permukaan luar dinding

$$T_s = T_o + (I.\alpha.\cos\beta\ /f_o)$$
$$= 30 + (600)(0{,}72)(\cos 60)/(10)$$
$$= 30 + (600)(0{,}72)(0{,}5)/10$$
$$= 30 + 21{,}6$$
$$= 51{,}6\ ^\circ\text{C}$$

Maka $\Delta T_{dinding} = 51{,}6 - 25$
$= 26{,}6\ ^\circ\text{C}$

Q_i = Σ panas (manusia, peralatan rumah tangga)
= panas lampu + panas manusia
= (4)(24) + (6)(140)
= 96 + 840
= 936 W

Q_s = panas matahari yang menembus kaca
0 W → karena jendela kaca terlindungi oleh tritisan

Q_c = panas melalui dinding + panas melalui kaca
$= A_{dinding}.U_{dinding}.\Delta T + A_{kaca}.U_{kaca}.\Delta T$
$= (5)(1)(0,85)(26,6) + (5)(1,5)(4,48)(5)$
$= 113,05 + 168$
$= 281,05$ W

Q_v = panas karena ventilasi
$= (1300)(0,0087)(5)$
$= 56,55$ W

Bilangan 0,052 diperoleh dari (volume ruangan)(ACH)/3600 dtk
$= (5)(5)(2,5)(0,5)/3600$
$= 0,0087$ m^3/dtk.

$Q_m = Q_i + Q_s + Q_c + Q_v$
$= 936 + 0 + 281,05 + 56,55$
$= 1273,6$ W ~ 1,27 kW
(beban penyejukan/pendinginan)

Dari contoh brosur kita dapat memilih AC split berkapasitas pendinginan **2,00 kW** yang membutuhkan daya listrik **0,55 kW** (lihat ***Gambar 2.9*** model CS-C7BKN). Biaya pemakaian listrik per jamnya = (0,55kWh)(Rp 400,00/kWh) = **Rp 220,00.**

Mari kita bandingkan. Kondisi awal menyebabkan beban pendinginan 5,67 kW (jawaban soal a) sehingga setidaknya kita harus memilih AC dengan kapasitas pendinginan 5,40 kW yang memerlukan daya listrik 1,68 kW. Setelah diadakan perubahan-perubahan (seperti jawaban soal b), beban penyejukan menjadi 1,27 kW saja, sehingga cukup memakai AC berkapasitas pendinginan 2,00 kW yang membutuhkan daya listrik 0,55 kW.

Penghematan listrik yang didapat = 1,68 kW – 0,55 kW = 1,13 kW. Jika kondisi tersebut berlangsung dalam waktu 1 jam, maka penghematan akan menjadi 1,13 kWh.

Tipe Split Tunggal

Model	Kapasitas Pendinginan		EER	Data Listrik			Laju Pengembunan	Sirkulasi Udara (Ruangan Hi)	Dimensi Kabinet (Unit Luar)			Berat Bersih	Pipa Refrigeran Diameter mm (inch)	
	Btu/	kW	Btu/W	Tegangan V	Daya Listrik kW	Arus Kerja A	l/j	m³/min	Tinggi mm	Lebar mm	Tebal mm	kg	Bagian Gas	Bagian Cair
CS-C7BKN (CU-C7BKN5)	6.820	2,00	12,4	220	0,55	2,7	1,3	8,5	275 (540)	799 (780)	210 (289)	9,0 (28)	6,35 (1/4)	9,52 (3/8)
CS-C9BKN (CU-C9BKN5)	9.040	2,65	12,2	220	0,74	3,5	1,6	9,9	275 (540)	799 (780)	210 (289)	9,0 (31)	6,35 (1/4)	9,52 (3/8)
CS-C12BKN (CU-C12BKN5)	12.300	3,60	11,1	220	1,11	5,1	2,1	10,2	275 (540)	799 (780)	210 (289)	9,0 (35)	6,35 (1/4)	12,70 (1/2)
CS-C18BKN (CU-C18BKN5)	18.400	5,40	10,95	220	1,68	7,8	2,9	14,9	275 (685)	895 (800)	210 (300)	11,0 (55)	6,35 (1/4)	12,70 (1/2)
CS-C24BKN (CU-C24BKN5)	24.000	7,03	10,21	220	2,35	11,5	4,0	16,9	275 (685)	895 (800)	210 (300)	11,0 (60,5)	6,35 (1/4)	15,88 (5/8)
CS-C56KJ (CU-C56KJ)	5.000	1,50	12,65	220	0,39	1,9	1,0	4,4	290 (480)	790 (780)	152 (245)	8,0 (26)	6,35 (1/4)	9,52 (3/8)
CS-C76KJ (CU-C76KJ)	7.000	2,05	12,3	220	0,57	2,8	1,3	6,4	290 (480)	790 (780)	152 (245)	8,0 (26)	6,35 (1/4)	9,52 (3/8)
CS-C96KJ (CU-C96KJ)	9.000	2,60	10,7	220	0,84	4,0	1,6	7,3	290 (480)	790 (780)	152 (245)	8,0 (29)	6,35 (1/4)	9,52 (3/8)

Gambar 2.9 *Contoh spesifikasi AC tipe split tunggal dari National*

Catatan: Ingat bahwa Watt adalah Joule/dtk sedang Wh (watthour) berasal dari (Joule/dtk)(3600dtk) = (watt)(jam). Dalam teks bahasa Inggris ditulis watthour, disingkat Wh. Kemudian karena kita bicara tentang ribuan Wh, satuan menjadi kiloWatthour yang disingkat kWh.

Perusahaan Listrik Negara (PLN) Indonesia tidak menghitung biaya listrik hanya berdasarkan perkalian antara pemakaian listrik dengan biaya per satuan daya saja, tetapi juga mempertimbangkan beberapa komponen seperti jenis usaha, tingkat besar pemakaian, dan tingkat beban dasar. Komponen jenis usaha dimaksudkan untuk meringankan biaya beban bagi instansi nirlaba seperti pendidikan, rumah sakit dan usaha sosial lain. Peningkatan biaya sesuai blok tingkat besar pemakaian dimaksudkan untuk mengajak masyarakat menghemat energi karena semakin tinggi pemakaian, angka biaya per satuan bebannya semakin tinggi pula. Jika ingin menghitung rekening listrik Anda secara rinci, melawatlah ke `http://www.pln.co.id/` yaitu *website* PLN. Di situ disediakan fasilitas simulasi *online* yang me-mungkinkan Anda menghitung secara nyata biaya listrik sesuai peraturan saat ini.

Jawaban soal c:

Dari jawaban soal b didapat penghematan daya listrik sebesar 1,13 kWh.

Biaya yang dapat dihemat per jamnya = (1,13 kWh)(Rp 400,00/kWh) = Rp 452,00. Jika dalam satu hari kondisi seperti di atas berlangsung 1 jam maka dalam 25 hari kerja akan dihemat = (25)(Rp 452,-) = **Rp 11.300,00.**

Ingat: Yang kita hitung di atas adalah biaya pemakaian saja tanpa memasukkan komponen biaya beban, perbedaan blok, serta sifat dari aktivitas (rumah tangga, bisnis, sosial, masing-masing mempunyai tarif yang berbeda!).

2.5.3 Menghitung OTTV

Pada sub-bab ini akan diberikan contoh sederhana cara menghitung OTTV. Sebenarnya menghitung OTTV itu mudah jika semua data bahan (transmitan, berat, absorpsi) dan kaca (SC) tersedia. Bila belum tersedia maka kita harus menghitung satu per satu (misalnya U dinding harus dihitung dari konduktivitas, k, bahan pembentuk dinding tersebut) dan SC jendela. Itu memerlukan kecermatan dan kesabaran. Jika berminat memperdalam maka Anda dapat mengunjungi:

`http://www.info.gov.hk/bd/english/documents/code/e_ottv.htm`
atau
`http://arch.hku.hk/research/BEER/hkottv.htm.`

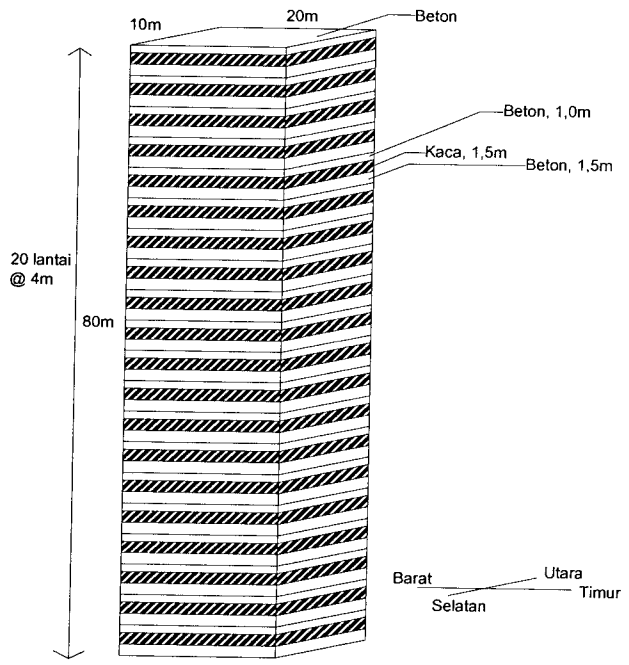
Soal: Bangunan 20 lantai terletak di Jakarta. Panjang = 20m. Lebar = 10m. Tinggi setiap lantai = 4m. Sumbu panjang searah dengan arah Timur-Barat. Model dinding setiap lantai sama, yaitu (dari bawah) 1,5m dinding beton, 1,5 kaca dan 1m dinding beton lagi. Atap datar dari beton bertulang.

Dinding:

Beton padat biasa setebal 152 mm. α_w = 0,86. Transmitan (U) = 3,58 W/m^{2}degC. Dicat hijau muda, α_p = 0,47. Berat jenis (ρ) = 2400 kg/m^3.

Jendela dari kaca berwarna kehijauan sejenis Classis Green 60 HC High Performance Film (lihat contoh di:

`http://www.sunshine.com.my/sample/window_film.htm).SC= 0,64.`



***Gambar 2.10** Bangunan berlantai banyak.*

Atap:

Sleb beton bertulang setebal 100 mm, lapisan *screed* 12 mm, ditambah lapisan jerami atau serutan kayu sebagai isolator setebal 50 mm, plus tiga lapis bulu kempa bitumen. Transmitan (U) 1,13 W/m^{2}degC. α 0,8.

Jawab:

Kita perlu mencari berat dinding per satuan luas (kg/m^2) untuk menghitung beda suhu ekivalen untuk dinding (ΔT_{eq}). Karena diketahui tebalnya, yaitu 152 mm, dan berat jenisnya, yaitu 2400 kg/m^3, maka berat beton/m^2 dapat dicari sebagai berikut:

ρ = Berat/Volume
Berat = (ρ) (Volume)
= (2400 kg/m^3)(1mx1mx0,152m)
= 364,8 kg

Dari ***Tabel 2.8*** didapatkan beda suhu ekivalen untuk dinding (ΔT_{eq}) = 10 K (atau 10 degC).

Untuk atap, berat per m^2 dapat dicari dengan menjumlahkan berat semua komponen per m^2 (Jadi kita harus menjumlahkan berat beton bertulang 100mm, *screed* 12mm, lapisan jerami 50mm dan tiga lapis bulu kempa 12mm. Kita asumsikan berat per m^2 = 300kg. Dengan demikian menurut ***Tabel 2.9*** kita peroleh ΔT_{eq} = 16 K (atau 16 degC).

Absorpsi dinding merupakan gabungan antara absorpsi bahan dinding dan absorsi cat (warna hijau muda) $\alpha = (\alpha_w + \alpha_p)/2$

= (0,86 + 0,47)/2
= 0,665

Dinding timur:

Luas jendela per lantai = (1,5m)(10m) = 15m^2. Luas jendela 20 lantai = (20)(15m^2) = 300m^2.
Luas dinding dan jendela per lantai = (4m)(10m) = 40m^2. Luas dinding dan jendela 20 lantai = (20)(40m^2) = 800 m^2.

Faktor Radiasi Matahari (SF) = 112 W/m^2.

$$\mathbf{OTTV_{timur}} = \alpha \{U(1\text{-}WWR)\}.\Delta T_{eq} + (SC)(WWR)(SF)\ \mathbf{W/m^2}$$
$$= 0{,}665\{3{,}58(1\text{-}300/800)\}(10) + (0{,}64)(300/800)(112)$$
$$= 0{,}665\ (22{,}75) + 26{,}88$$
$$= 14{,}88 + 26{,}88$$
$$= 41{,}76\ W/m^2$$

Dinding barat:

Segi luasan sama dengan dinding timur, SF = 243 W/m^2.

$$\mathbf{OTTV_{barat}} = \alpha \{U(1\text{-}WWR)\}.\Delta T_{eq} + (SC)(WWR)(SF)\ \mathbf{W/m^2}$$
$$= 0{,}665\{3{,}58(1\text{-}300/800)\}(10) + (0{,}64)(300/800)(243)$$
$$= 0{,}665\ (22{,}75) + 58{,}32$$
$$= 14{,}88 + 58{,}32$$
$$= 73{,}2\ W/m^2$$

Dinding utara:

Luas jendela per lantai = (1,5m)(20m) = 30m^2. Luas jendela 20 lantai = (20)(30m^2) = 600m^2.
Luas dinding dan jendela per lantai = (4m)(20m) = 80m^2. Luas dinding dan jendela 20 lantai = (20)(80m^2) = 1.600 m^2.

SF = 130 W/m^2.

$$\mathbf{OTTV_{utara}} = \alpha \{U(1\text{-}WWR)\}.\Delta T_{eq} + (SC)(WWR)(SF)\ \mathbf{W/m^2}$$
$$= 0{,}665\{3{,}58(1\text{-}600/1600)\}(10) + (0{,}64)(600/1600)(130)$$
$$= 14{,}879 + 31{,}2$$
$$= 46{,}079\ W/m^2$$

Dinding selatan:
Segi luasan sama dengan dinding utara.
SF = 97 W/m^2.

$$\mathbf{OTTV_{selatan}} = \alpha \{U(1\text{-}WWR)\}.\Delta T_{eq} + (SC)(WWR)(SF)\ \mathbf{W/m^2}$$
$$= 0{,}665\{3{,}58(1\text{-}600/1600)\}(10) + (0{,}64)(600/1600)(97)$$
$$= 14{,}879 + 23{,}28$$
$$= 38{,}159\ W/m^2$$

Jika kita perhatikan maka hasil perhitungan OTTV di atas dan mengingat standar dari Departemen Pekerjaan Umum yang menentukan OTTV maksimal 45 W/m^2, maka dinding barat dan utara berada di atas ambang batas, yaitu $OTTV_{barat}$ = 73,2 W/m^2 dan $OTTV_{utara}$ = 46,079 W/m^2. Dinding lain berada di bawah ambang batas. Namun, sesuai peraturan, maka OTTV harus didasarkan pada keseluruhan selubung bangunan. Jadi rata-rata dari seluruh dinding dan atap!

OTTV rata-rata seluruh dinding:

$$\mathbf{OTTV = \{(A_1)(OTTV_1) + (A_2)(OTTV_2) + \ldots (A_n)(OTTV_n)\}/(A_1 + A_2 + \ldots A_n)\ W/m^2}$$

$$= \{(A_{timur})(OTTV_{timur}) + (A_{barat})(OTTV_{barat}) + (A_{utara})(OTTV_{utara}) + (A_{selatan})(OTTV_{selatan})\}/(A_{timur} + A_{barat}\, A_{utara}\, A_{selatan})$$

$$= \{(800)(41,76)+(800)(73,2)+(1600)(46,079)+(1600)(38,159)\}/(800+800+1600+1600)$$

$$= (33408 + 58560 + 73726,4 + 61054,4)/4800$$

$$= 226748,8/4800$$

$$= \mathbf{47,24\ W/m^2}$$

OTTV rata-rata menunjukkan angka di atas standar DPU.

Atap:

Luas atap = (10m)(20m) = 200m^2. Transmitan (U) = 1,13 W/m^{2}degC. α = 0,8. Karena tidak memiliki lubang cahaya maka data SC dan SF tidak kita perlukan.

$$\mathbf{RTTV = \alpha\{(A_r)(U_r)(\Delta T_{eq})+(A_s)(U_s)(\Delta T)+(A_s)(SC)(SF)\}/(A_r+A_s)\ W/m^2}$$

$$= \{(200)(1,13)(16)+(0)+(0)\}/(200+0)$$

$$= \mathbf{18,08\ W/m^2}$$

OTTV rata-rata seluruh selubung bangunan:

$$\mathbf{OTTV = \{(A_1)(OTTV_1) + (A_2)(OTTV_2) + \ldots (A_n)(OTTV_n)\}/(A_1 + A_2 + \ldots A_n)\ W/m^2}$$

$$= \{(A_{timur})(OTTV_{timur}) + (A_{barat})(OTTV_{barat}) + (A_{utara})(OTTV_{utara}) + (A_{selatan})(OTTV_{selatan}) + (A_{atap})(RTTV)\}/(A_{timur} + A_{barat} + A_{utara} + A_{selatan} + A_{atap})$$

$$= \{(800)(41,76)+(800)(73,2)+(1600)(46,079)+(1600)(38,159)+(200)(18,08\}/(800+800+1600+1600+200)$$

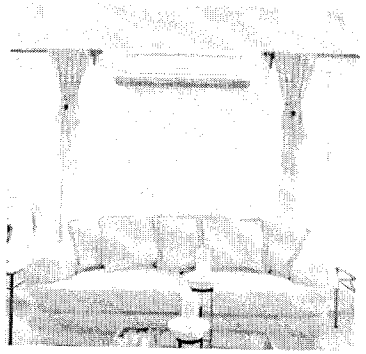
$$= (33408 + 58560 + 73726,4 + 61054,4 + 3616)/5000$$

$$= 200740,8/5000$$

$$= \mathbf{46,07\ W/m^2}$$

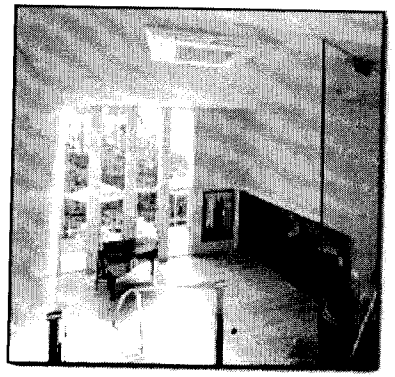
OTTV rata-rata seluruh selubung bangunan berada di atas ambang maksimal standar dari DPU (45 W/m^2).

2.6 Galeri



Gambar 2.11 *Contoh pemasangan AC tipe dinding buatan Daikin (global.daikin.com)*

Gambar 2.12 *Contoh pemasangan AC tipe lantai buatan Daikin (global.daikin.com)*



Gambar 2.13 *Contoh pemasangan AC tipe kaset buatan Fujitsu (www.fujitsu.com)*

Gambar 2.14 *Contoh pemasangan AC tipe langit-langit buatan Fujitsu (www.fujitsu.com)*

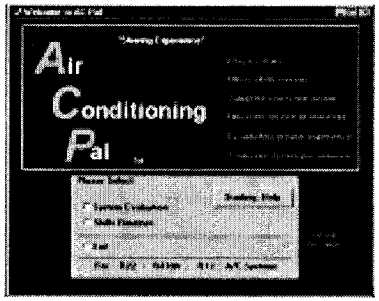
Gambar 2.15 *Contoh pemasangan AC tipe dinding buatan Fujitsu (www.fujitsu.com)*

2.7 Alamat Internet

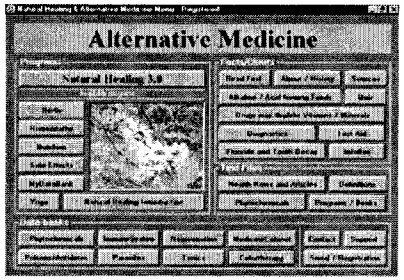
http://windows.lbl.gov/software/window/window.html; *freeware* Jendela untuk menghitung SC (*Shading Coefficient*), dll.
http://www.arch.hku.hk/research/BEER/best.htm; Building Energy Simulation Tools (BEST)

http://www.aromaweb.com/links/default.asp; Kumpulan informasi untuk terapi aroma.
http://www.ashrae.org; Alamat American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers yang merupakan organisasi besar para insinyur bidang penghawaan.
http://www.bigassfans.com/; Contoh perusahaan yang menyediakan fan berdiameter besar (1,8m hingga 7,3m). Fan ini tidak bising karena bergerak lambat namun dapat mengalirkan angin dalam volume besar. Cocok untuk daerah tropis lembab yang memerlukan pergerakan angin untuk penyejukan fisiologis.
http://www.negativeionsinformation.org/ ; Informasi mengenai ion.
http://www.edasolutions.com; EDA Incorpo-rated adalah milik American Society of Mechanical Engineers (**ASME**), National Society of Professional Engineers (**NSPE**), Society of Instrument Control Engineers, Society of Professional Engineers (**ISA**) dan American Nuclear Society (**ANS**) yang banyak memberikan informasi berkaitan HVAC, termasuk *freeware*.
http://www.elitesoft.com/sci.hvac/software.html; Informasi mengenai *freeware* untuk HVAC.
http://www.ezdirectory.com/HVAC; Memuat seluk-beluk HVAC, mulai dari *software* hingga produk.
http://www.fges.demon.co.uk/cfd/CFD_codes_p.html; *freeware* CFD.
http://www.info.gov.hk/bd/english/documents/code/e_ottv.htm; Jika Anda ingin belajar OTTV lebih lanjut, *website* pemerintah Hong Kong ini memberikan contoh perhitungan yang cukup bagus, walau rumit.
http://www.pln.co.id/; Alamat Internet Perusahaan Listrik Negara Indonesia yang bagus, menyediakan informasi lengkap di seputar kebijakan dan tarif listrik. Di situ disediakan fasilitas bagi masyarakat untuk menghitung sendiri rekening listrik yang harus dibayar sesuai pemakaian mereka.

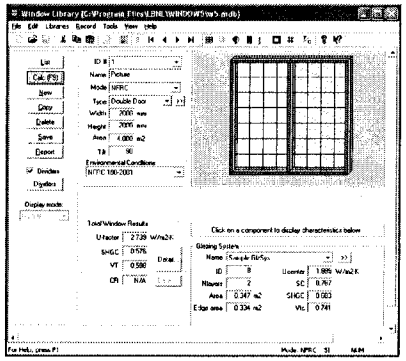
2.8 Software



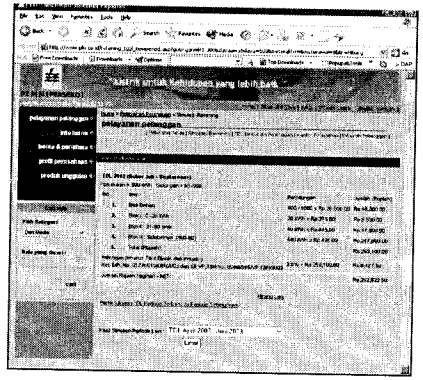
Gambar 2.16 *Air Conditioning Pal (program untuk belajar seluk-beluk AC)*
(http://www.ac-pal.com/)



Gambar 2.17 *Natural Healing Software*
(program untuk belajar terapi aroma dan warna).
(http://www.alternative-medicine-software.com/natural_healing.htm)



Gambar 2.18 *Window5 cara mudah untuk menghitung SC dan lain lain!*
(http://windows.lbl.gov/software/window/window.html)

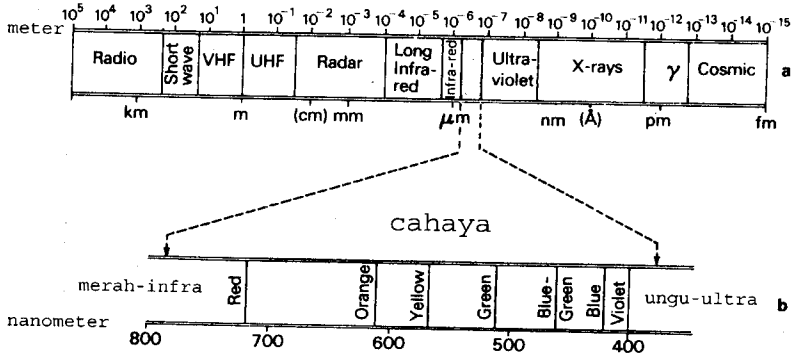


Gambar 2.19 Fasilitas yang disediakan oleh Perusahaan Listrik Negara untuk menghitung biaya listrik Anda .(*http://www.pln.co.id*)

BAB 3
PENCAHAYAAN ALAMI

Cahaya adalah syarat mutlak bagi manusia untuk melihat dunianya. Tanpa cahaya, maka dunia akan gelap, hitam, dan mengerikan. Keindahan tidak akan tampak dan ternikmati. Manusia membutuhkan cahaya untuk beraktivitas dengan sehat, nyaman dan menyenangkan. Tanpa cahaya, tidak ada arsiktektur!

Matahari sebagai sumber cahaya alami utama bagi bumi mempunyai peran penting dalam sejarah kehidupan manusia. Terbit pagi hari dari ufuk timur dan terbenam sore hari di ufuk barat, begitulah siklus harian perjumpaan manusia dengan sang surya. Sinar dan cahaya matahari telah memberikan energi dan inspirasi yang tiada habisnya bagi manusia.



***Gambar 3.1** Spektrum radiasi*

Saat ini, ketika energi fosil semakin mahal dan langka, kita perlu lebih serius mempertimbangkan apa yang diberikan oleh matahari secara gratis. Para arsitek hendaknya tidak lagi mengabaikan potensi matahari. Desain yang menyebabkan kita harus menghidupkan lampu yang boros energi di dalam ruangan, sementara di luar cahaya terang benderang dari matahari tersedia gratis haruslah dihindari.

Di daerah katulistiwa yang beriklim tropis lembab seperti Indonesia, matahari memang hadir dalam suasana yang mendua. Matahari dicintai karena memberikan energi (panas dan cahaya) berlimpah, namun juga dibenci karena menyebabkan ketidak-nyamanan. Dalam banyak kesempatan matahari lebih dilihat sebagai gangguan. Oleh karena itu dalam arsitektur pun masyarakat Indonesia memberikan perhatian khusus pada atap yang berfungsi sebagai pelindung terhadap sengatan panas matahari. Matahari dianggap sebagai gangguan yang harus diminimalkan dampaknya.

Dengan anggapan seperti itu maka arsitek harus mengingat kembali bahwa bagaimanapun matahari adalah sumber energi yang sangat besar dan gratis. Bukankah energi dapat diubah-ubah bentuknya? Oleh karena itu kecerdikan Andalah yang akhirnya akan menentukan apakah energi dahsyat dari sang surya itu akan menjadi gangguan ataukah berkah. Rancangan arsitektur bangunan menjadi sangat penting untuk mengubah potensi negatif energi surya menjadi potensi positif (atau setidaknya mengurangi dampak negatif) sementara potensi positif dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Beberapa kelebihan cahaya dan sinar matahari antara lain adalah sebagai berikut:

- Bersifat alami (*natural*). Manusia pada dasarnya tidak ingin dicabut dari alam dan selalu ingin berada di dalam atau dekat dengan alam. Memaksakan diri hidup terpisah dari lingkungan alami akan memicu ketegangan batin maupun fisik. Cahaya alami matahari memiliki nilai-nilai (baik fisik maupun spiritual) yang tak tergantikan oleh cahaya buatan;
- Tersedia berlimpah;
- Tersedia secara gratis;
- Terbarukan (tidak habis-habisnya, sampai matahari mati!);
- Memiliki spektrum cahaya lengkap;
- Memiliki daya panas dan kimiawi yang diperlukan bagi mahluk hidup di bumi;
- Dinamis. Arah sinar matahari selalu berubah oleh rotasi bumi maupun peredarannya saat mengelilingi matahari. Intensitas cahaya yang berubah-ubah oleh adanya halangan awan yang melintas akan memberikan efek gelap-terang yang menambah kesan dinamis;

- Dapat digunakan untuk pengobatan (*heliotherapy*);
- Lebih alami bagi irama tubuh (*bio-rhytm*);
- Keperluan fotografi alami.

Sedangkan beberapa kelemahan cahaya matahari untuk dipergunakan mencahayai ruangan adalah sebagai berikut:

- Pada bangunan berlantai banyak dan gemuk (berdenah rumit) sulit untuk memanfaatkan cahaya alami matahari (walau ada teknologi serat kaca yang dapat menyalurkan cahaya jauh ke dalam ruangan);
- Intensitasnya tidak mudah diatur, dapat sangat menyilaukan atau sangat redup;
- Pada malam hari tidak tersedia;
- Sering membawa serta panas masuk ke dalam ruangan;
- Dapat memudarkan warna.

Karena sinar-matahari-langsung membawa serta panas, maka cahaya yang dimanfaatkan untuk pencahayaan ruangan adalah cahaya bola langit. Sinar-matahari-langsung hanya diperkenankan masuk ke dalam ruangan untuk keperluan tertentu atau bila hendak digunakan untuk mencapai efek tertentu. Oleh karena itu arsitek perlu mengingat dua hal penting, yaitu:

- Pembayangan; untuk menjaga agar sinar-matahari-langsung tidak masuk ke dalam ruangan melalui bukaan. Teknik pembayangan antara lain dilakukan memakai tritisan dan tirai.
- Pengaturan letak dan dimensi bukaan untuk mengatur agar cahaya bola langit dapat dimanfaatkan dengan baik.
- Pemilihan warna dan tekstur permukaan dalam dan luar ruangan untuk memperoleh pemantulan yang baik (agar pemerataan cahaya efisien) tanpa menyilaukan mata.

Perlu diketahui bahwa langit di Indonesia sering sangat menyilaukan akibat adanya awan putih merata. Kesilauan ini sering mengakibatkan mata penat. Sebaliknya, di iklim dingin, langit sering berwarna biru tua jernih yang sangat indah dan sejuk di mata (walau pada saat musim salju maka pemandangan juga sangat menyilaukan).

3.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Pencahayaan

Sub-bab ini akan membahas istilah-istilah yang perlu diketahui guna memahami pencahayaan. Jika diperlukan definisi istilah lainnya, kunjungi http://www.schorsch.com/kbase/glossary/). Untuk bacaan gratis, di internet banyak tersedia, salah satu contoh: http://www.erco.com/ .

Cahaya (*light*) adalah gelombang elektromagnet yang mempunyai panjang antara 380 hingga 700 nm (nanometer, 1 nm $=10^{-9}$m), dengan urutan warna: (ungu-ultra), ungu, nila, biru, hijau, kuning, jingga, merah, (merah-infra). Ungu-ultra dan merah-infra hanya dapat dilihat dengan bantuan alat optik khusus. (Lihat: Gambar 3.1 ***Spektrum radiasi***) Ungu-ultra (290-380 nm) berdaya kimia, sedangkan merah-infra (700-2300 nm) berdaya panas. Kecepatan cahaya adalah $3x10^8$ m/dtk. **Sinar** adalah berkas cahaya yang mengarah ke suatu tujuan. Kita mengatakan. "*Cahaya matahari menyinari bumi.*"

Cahaya matahari (*sunlight, daylight*) mempunyai panjang gelombang antara 290 hingga 2300 nm dan mempunyai spektrum lengkap dari ungu-ultra hingga merah-infra. Mata manusia paling peka terhadap cahaya kuning (550 nm).

Cahaya langit (*sky light*) adalah cahaya bola langit. Cahaya inilah yang dipakai untuk penerangan alami ruangan, bukan sinar-matahari-langsung. Sinar-matahari-langsung akan sangat menyilaukan dan membawa panas, sehingga tidak dipakai untuk menerangi ruangan. Catatan: Hindari kekacauan antara *sky light* dan *skylight* (disambung) yang berarti kaca atap atau jendela loteng!

Cahaya buatan (*artificial light*) adalah segala bentuk cahaya yang bersumber dari alat yang diciptakan manusia, seperti lampu pijar, lilin, lampu minyak tanah dan obor. Lawan dari cahaya buatan adalah cahaya alami, yaitu cahaya yang bersumber dari alam, misalnya: matahari, lahar panas, fosfor di pohon-pohon, kilat, dan kunang-kunang. Bulan adalah sumber cahaya alami sekunder karena dia sebenarnya hanya memantulkan cahaya matahari.

Dalam pembicaraan kuantitatif cahaya, kita akan menemukan istilah-istilah berikut:

- **Arus cahaya** (*luminous flux, flow*; diukur dengan lumen) adalah banyak cahaya yang dipancarkan ke segala arah oleh sebuah sumber cahaya per satuan waktu (biasanya per detik).

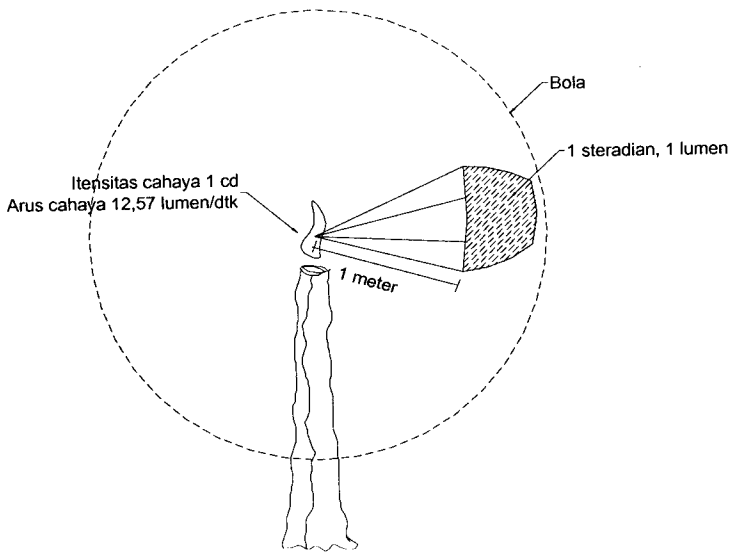
- **Intensitas sumber cahaya** (*light intensity*; *luminous intensity*; diukur dengan candela) adalah kuat cahaya yang dikeluarkan oleh sebuah sumber cahaya ke arah tertentu. Sebuah sumber cahaya berintensitas 1 candela (1 lilin) mengeluarkan cahaya total ke segala arah sebanyak 12,57 lumen. (12,57 adalah luas kulit bola berjari-jari 1 meter dengan sumber cahaya sebagai titik pusatnya.) Dengan kata lain, 1 candela = 1 lumen per 1 sudut bola (steradian).
- **Iluminan** (*Illuminance*; diukur dengan lux, lumen/m^2) adalah banyak arus cahaya yang datang pada satu unit bidang. **Iluminasi** (*Illumination*) adalah datangnya cahaya ke suatu objek.
- **Luminan** (*Luminance*; diukur dengan candela/m^2) adalah intensitas cahaya yang dipancarkan, dipantulkan, atau diteruskan oleh satu unit bidang yang diterangi. (Tetapi kita mengukur terang yang dipantulkan oleh sebuah bidang dengan candela/m^2; demikian juga kita mengukur terang bidang yang meneruskan cahaya, seperti kaca lampu, dengan candela/m^2). Pada buku referensi lama sering di-gunakan satuan footLambert (fL), untuk membedakan satuan luminan dari iluminan. FootLambert = (Footcandle)x(Reflection Factor). **Luminasi** (*Lumination*) adalah perginya cahaya dari suatu objek.

Tabel 3.1 *Simbol dan satuan dalam cahaya*

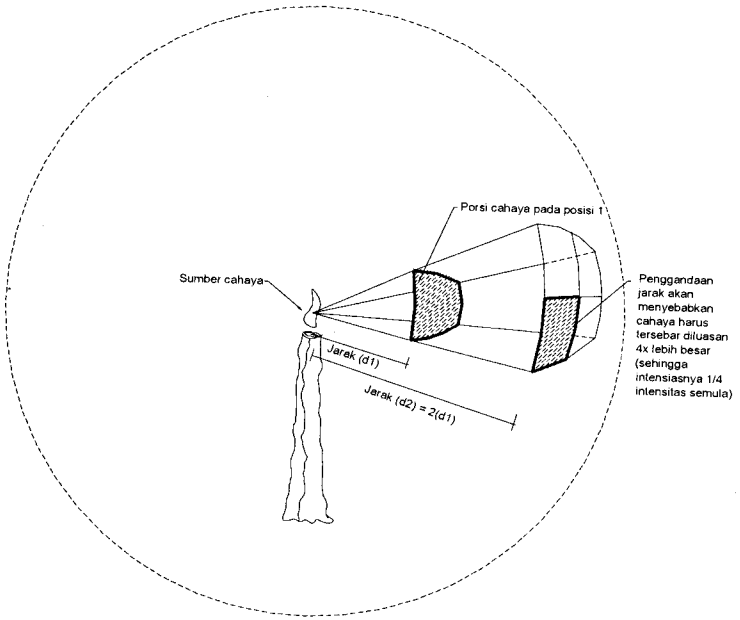
Kesatuan	Simbol	Satuan	Simbol satuan
Kuat cahaya (Intensitas cahaya)	I	Lilin (candela, *candlepower*)	cd
Arus cahaya, yaitu jumlah banyak cahaya (Q) per satuan waktu (t); $\Phi = Q/t$	Φ	lumen	lm
Arus cahaya yang datang (iluminan) per satuan luas permukaan $E=Q/A$	E	Lux	lx
Arus cahaya yang pergi (luminan) per satuan luas permukaan $IL=I/A$	IL	Cd/m^2	Cd/m^2

- **1 lilin** (*candela*) kira-kira sama dengan cahaya yang dihasilkan oleh sebuah lilin kecil; dalam standar SI (*System International*) sama dengan intensitas yang diberikan oleh 1/60 cm^2 radiator hitam pada titik leleh platina.

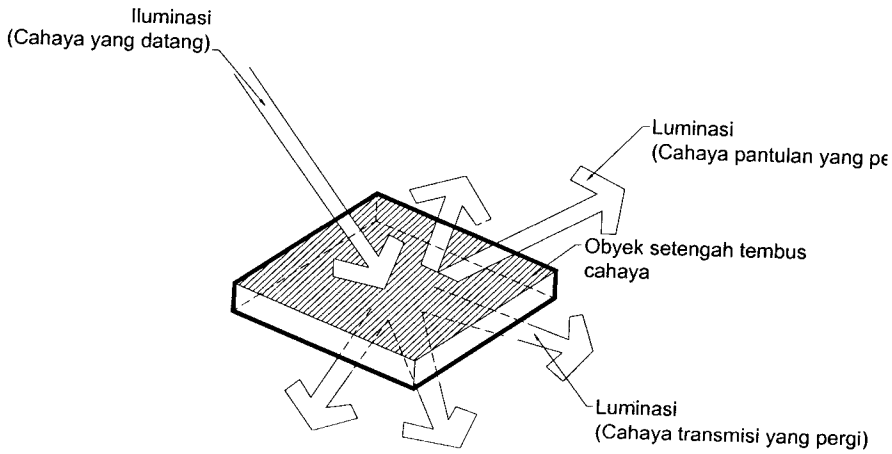
- **1 fc** (*footcandle*, lumen/ft^2) = 10,79 lx (lux, lumen/m^2). Untuk memudahkan dalam mengingat sering dianggap 1 fc = 10 lx.
- **1 lux** (lx) adalah iluminan (E) pada bidang bola berjari-jari 1 m yang bertitik pusat sumber berkekuatan cahaya (I) sebesar 1 cd.
- **1 lumen** (lm) adalah arus cahaya (Φ) pada 1 m^2 bidang bola berjari-jari 1m yang bertitik pusat sumber berkekuatan cahaya (I) sebesar 1 cd.
- **Faktor cahaya siang hari** (*Daylight Factor*, DF) perbandingan antara iluminan di satu titik di dalam ruangan dengan titik di luar ruangan. Harga DF ini tetap. Bila cahaya di luar meredup maka cahaya di dalam ruangan pun ikut meredup.
- **Langit rancangan** (*Design Sky light*), luminan langit yang dipergunakan sebagai patokan perancangan, yaitu kondisi langit yang terjadi sebanyak 90%. Untuk Indonesia dipakai 10.000 lux.
- **Hukum kuadrat terbalik** (*inverse square law*) adalah hukum yang menyatakan bahwa intensitas cahaya akan menjadi seperempatnya setiap kali jarak digandakan.



***Gambar 3.2** Besaran cahaya*



***Gambar 3.3** Hukum kuadrat terbalik untuk cahaya*



***Gambar 3.4** Iluminasi dan luminasi*

3.2 Memperkirakan Intensitas Cahaya yang Dipancarkan Objek

Intensitas cahaya yang dipancarkan suatu objek (luminan) dapat diukur dengan *light meter* (sering disebut lux meter). Namun bila alat tersebut tidak ada, dapat dikira-kira dengan menggunakan Tabel 3.2.

***Tabel 3.2** Luminan*

Objek	Luminan (cd/m^2)
Sarung tangan hitam di malam mendung	0,0003
Dinding cerah di kantor yang diterangi dengan baik	100
Kertas buku ini di kantor	120
Lampu *electroluminescent* hijau	150
Aspal di siang hari berawan merata	1.300
Langit utara	3.500
Bulan, nyala lilin	4.000-5.000
Lampu neon (*fluorescent*)	7.000-8.000
Nyala api kerosen	8.500
Langit berkabut	15.000
Salju di bawah sinar matahari	25.000
Lampu pijar 100W	50.000
Matahari	23.10^8

Sumber: B. Stein, 1986.

Membeli lux meter (pengukur lux) pribadi sudah barang tentu jarang terpikirkan, kecuali bagi mereka yang benar-benar tertarik dengan masalah desain pencahayaan. Meski tidak memiliki pengukur lux bukan berarti tidak dapat merancang penerangan dengan baik. Kita bisa memanfaatkan pengukur cahaya yang terdapat di kamera.

Pasanglah kecepatan film pada ASA 100, diafragma 4 lalu arahkanlah lensa kamera ke kertas putih yang ditaruh di bidang yang akan diukur intensitas cahaya yang jatuh padanya, kira-kira sejarak 5 cm dari kertas. Bacalah kecepatan yang disarankan oleh kamera sebagai bilangan bulat (dibalik) lalu kalikanlah dengan angka 10. Maka angka yang didapat adalah intensitas cahaya pada bidang tersebut. Misalnya kecepatan yang disarankan 1/60, dibaca sebagai bilangan bulat 60 lalu dikalikan 10, maka didapat 600 lux. Kalau kecepatan 1/1000 dibaca 1000 lalu x10 diperoleh 10.000 lux. (Ingat; bila ingin akurat, kalikanlah dengan 10,76 karena sebenarnya 1 fc=10,76 lx).

***Tabel 3.3** Menghitung intensitas cahaya yang datang ke suatu permukaan dengan kamera*

ASA	Diafragma (f/...)	Kecepatan (1/... detik)	Intensitas cahaya (lux)	Diafragma (f/...)	Kecepatan (1/... detik)	Intensitas cahaya (lux)
100	4	2	20	8	500	10000
		4	40		1000	20000
		8	80		2000	40000
		15	150			
		30	300	16	500	20000
		60	600		1000	40000
		125	1250		2000	80000
		250	2500			
		500	5000			
		1000	10000			
		2000	20000			

Sumber: Baker, 1987

Bagaimana dengan mengukur faktor refleksi permukaan bidang? Mudah saja. Dengan kamera tetap pada posisi, singkirkanlah kertas putih tadi, dan sekarang catatlah kecepatan yang disarankan oleh kamera. Jadi misalnya dengan kertas putih tadi ketemu angka 2500 lux, dan setelah diambil ternyata ketemu angka 600 lux maka bilangan pantul permukaan bidang adalah 600/2500 atau 0,24.

3.3 Ringkasan Pengetahuan Dasar

Mata mengandung sel-sel kerucut (*cone cels*, untuk siang hari dan mengenali warna), serta sel-sel batang (*rod cels*, untuk malam hari dan tidak dapat menangkap detail serta warna). Untuk adaptasi mata dari terang ke gelap, sel-sel kerucut membutuhkan waktu 2 menit sedang sel-sel batang membutuhkan waktu 40 menit.

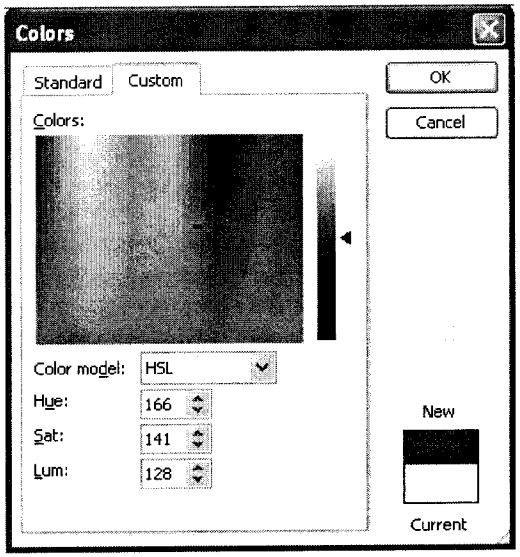
Kejelasan suatu objek tergantung pada iluminan, ukuran objek, dan kontras antara objek dengan sekitarnya. Kontras antara objek dengan latar belakang perlu tinggi agar objek mudah dikenali. Setiap 1% penurunan kontras harus diimbangi 15% tambahan kekuatan penerangan.

Warna sebuah objek sebenarnya adalah elemen warna cahaya yang dipantulkan. Benda dapat menyerap, memantulkan dan menguraikan elemen warna cahaya. Cahaya matahari mengandung spektrum warna lengkap. Bila kita melihat sebuah apel berwarna merah, itu karena kulit apel bersangkutan

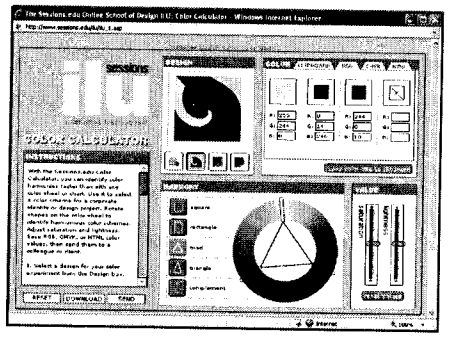
jenuh terhadap warna merah, sehingga warna merah dipantulkan. Bila sebuah benda menyerap seluruh elemen warna cahaya, maka benda itu akan berwarna hitam. Demikian juga, benda yang jenuh warna merah, bila diterangi dengan cahaya yang tidak mengandung elemen warna merah, maka akan tampak gelap.

Warna dapat dicampur-campur untuk memperoleh warna baru. Untuk cahaya, pencampuran warna akan bersifat aditif, sehingga warna cahaya merah, hijau dan biru akan menjadi putih. Namun untuk cat (pigmen), pencampuran warna akan bersifat substraktif, sehingga campuran cat akan berwarna hitam.

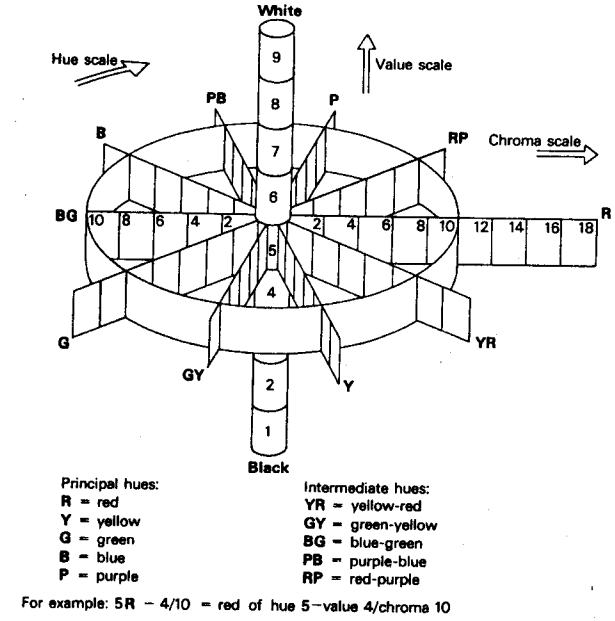
Salah satu cara untuk mengidentifikasi warna adalah dengan sistem Munsell. Namun perusahaan cat biasanya mempunyai penomoran sendiri disertai dengan nama dagang yang komunikatif dan menarik, misalnya warna putih apel (*apple white*), putih gading (*ivory white*), putih kotor (*broken white*) dan putih murni (*pure white*). Setiap warna dasar diikuti oleh banyak warna kelompok, misalnya kita mengenal warna merah darah, merah maroon, merah hati dan biru laut, biru angkatan laut, biru benhur, dll.



Gambar 3.5 *Fasilitas pencari warna pada software komputer dapat digunakan untuk mencari rumus warna berdasar komposisi Hue, Sat, Lum atau Red, Green, Blue. Ingat bahwa komposisi tersebut untuk cahaya, bukan cat.*



Gambar 3.6 *Kalkulator warna dapat pula diperoleh di internet (contoh: http://www.sessions.edu/ilu/ilu_1.asp)*



Sumber: O.H. Koenigsberger

Gambar 3.7 *Sistem warna munsell*

Setiap orang dapat mempunyai penilaian yang berbeda terhadap warna, tergantung pengalaman masing-masing. Namun beberapa penelitian menemukan kecenderungan sebagai berikut:

- Warna kuning paling mudah dikenali sehingga membantu mata untuk fokus pada objek, sedang warna biru relatif paling sulit dikenali.
- Wanita lebih suka warna kuning sedang pria lebih suka warna jingga.
- Bayi suka warna kuning, putih, merah muda, merah.
- Pada umumnya mereka tertarik oleh sumber cahaya cerah. Mereka suka memandangi warna-warna kuning, putih, merah jambu, dan merah. Mereka juga akan mengikuti sumber sinar yang bergerak dan tertarik oleh cahaya yang berkedip-kedip atau berkilauan. Bertambah umur, kesukaan terhadap warna kuning akan berubah perlahan diganti dengan warna merah, kemudian biru. Hitam, coklat dan abu-abu adalah warna yang paling tidak disukai.
- Orang tua membutuhkan lebih banyak cahaya.
- Warna-warna tertentu diduga mempunyai efek universal, misalnya merah itu hangat, biru itu dingin.

Sinar merah-infra baik untuk kesehatan, dapat masuk ke jaringan kulit dan otot, serta mendukung metabolisme. Sinar ungu-ultra tidak menembus kulit, tetapi dapat menyebabkan kanker kulit. Lampu-lampu yang dapat memancarkan sinar ungu-ultra (seperti metal-halide) harus dilengkapi dengan pelindung (filter). Orang-orang kulit berwarna (berpigmen) tidak mengalami kecenderungan terkena kanker kulit akibat sinar ungu-ultra seperti orang berkulit putih.

Penerangan mengandung aspek kuantitas (intensitas cahaya) dan kualitas (warna, kesilauan). Kesilauan dapat terjadi secara langsung (tersorot lampu) maupun tidak langsung (pantulan). Terlalu banyak cahaya akan menyebabkan *orang-orangan mata* mengecil terlalu lama, sehingga mata lelah. Terus-menerus berada di tempat bercahaya sama merugikannya dengan terus-menerus di tempat gelap karena irama gelap-terang yang membantu pengendalian suhu tubuh serta sekresi hormon ke darah akan terganggu. Menurut Faber Birren, warna merah cenderung menaikkan tekanan darah, detak jantung, pernafasan, respons kulit (perspirasi), gelombang otak, tegangan otot serta jumlah kedipan mata. Warna biru memberikan reaksi kebalikannya. Warna hijau cenderung netral. Jingga dan kuning mempunyai efek sama dengan merah, walau tidak begitu kentara. Nila dan ungu memberi

efek sama dengan biru. Reaksi-reaksi tersebut hanya berlangsung sementara karena manusia dapat beradaptasi.

Sebuah penelitian menemukan bahwa supermarket dengan lampu fluorescent tergantung bebas di langit-langit lebih disukai daripada supermarket yang menggunakan penyinar bawah lampu-lampu metal-halide (walau diwadahi hingga tidak menyilaukan). Pelanggan merasakan pada sistem penerangan yang pertama barang-barang lebih mudah ditemukan, sedang pada sistem kedua suasana menjadi terlalu gelap. Mata tumbuh dan berkembang di bawah sinar alami matahari. Supermarket berlangit-langit tinggi dan bercahaya mungkin memberi efek tiruan langit alami yang memberi perasaan aman.

Manusia memberi respons estetis dan emosional. Respons estetis menyangkut baik-buruk, gelap-terang, terlalu merah-terlalu biru yang merupakan respons seketika. Sedang respons emosional menyangkut suasana hati gembira, bosan, senang, terhanyut, dll., yang merupakan reaksi perasaan mendalam yang berkembang perlahan-lahan. Respons estetis berguna untuk menarik perhatian secara cepat, seperti di kaca etalase, restoran, dan pertunjukan. Respons emosional dimaksudkan agar orang yang lewat merasa nyaman, gembira, dan terundang sehingga mereka suka tinggal lebih lama.

Intensitas cahaya mengandung simbol yang dapat memengaruhi aktivitas. Misalnya, di gedung teater, bila lampu meredup maka aktivitas bicara akan berkurang karena berarti pertunjukan akan segera dimulai. Sebaliknya di toko, bila lampu meredup, aktivitas akan menjadi giat (tergesa-gesa) karena hal itu mungkin tanda bahwa toko akan segera tutup.

Manusia menyukai lingkungan yang terang. Pada kumpulan manusia, mereka akan menyukai penerangan yang relatif merata dan menghindari area yang terlalu terang. Kecuali untuk mereka yang memang menjadi pusat perhatian, seperti artis penghibur, pembawa acara, dll. Pada umumnya manusia lebih suka berada di tempat yang agak redup kemudian memandang ke tempat terang, daripada berada di tempat yang terang tersebut. Hal ini pernah diteliti oleh Flynn terhadap pengunjung cafe.

Warna dapat dihubungkan dengan suasana hati:

- Merah → kehangatan dan kesenangan; menggairahkan dan merangsang; panas dan bahaya.

- Emas → ningrat dan mewah; bersorak-sorai, riang-gembira; gemerlap; ornamental.
- Jingga → ramah-tamah, menyenangkan dan bercahaya; hangat dan menggairahkan; menggelisahkan, membingungkan.
- Biru → ketenangan dan keredaan; menyejukkan dan menentramkan; sejuk, lembut, dan menyegarkan; kesedihan.
- Hijau → ketenangan dan keredaan; menyejukkan dan menentramkan; alami; sejuk dan menyegarkan.
- Putih → kemurnian dan kebersihan; monoton dan membosankan; menyilaukan.
- Ungu → ketaatan dan kesepian; kekhidmatan; elok
- Kuning → bersorak-sorai, riang gembira.
- Coklat → tak gembira, patah hati; warna tanah dan netral
- Hitam →dukacita, kekhidmatan; kematian, keputusasaan; kesedihan

Sedang ahli stres Alix Kirsta (1996) memberikan penilaian sebagai tabel berikut:

Tabel 3.4 *Warna dan kesan menurut ahli manajemen stress, Alix Kirsta*

Warna	Makna
Lila	Berhubungan dengan nilai-nilai spiritual, keseimbangan diri, damai, tenang
Biru tua	Tenang, sejuk, mengurangi ketegangan dan kekhawatiran, memberi kesan longgar pada ruang
Biru muda	Sejuk, perasaan ruang lebih lega, kesegaran
Hijau	Menggambarkan keseimbangan, ketiadaan gerak, cenderung menyebabkan kelesuan bila dipakai di ruang dalam
Kuning	Dapat mengganggu atau menyakitkan, memberi kesan ketiadaan ruang, melambangkan hilangnya akal-budi
Jingga	Kesukariaan, tetapi dapat terasa kaku, sedikit mengurangi keluasan ruang
Merah	Menggairahkan dan hangat, mengurangi kesan luas ruang, menindas
Merah jambu	Berhubungan dengan ketenangan, spritualitas, ketentraman, kesabaran
Abu-abu	Ragu-ragu, dengan bayangan coklat akan berkesan melindungi. Abu-abu biru berkesan lebih lembut dan lebih positif dari abu-abu putih.
Putih	Melambangkan kesucian dan spirualitas, efek dapat bervariasi dari menenteramkan hingga dingin menyakitkan

Iluminasi (penerangan) yang diperlukan sangat bervariasi tergantung rumit tidaknya kerja visual. Semakin rumit kerja visual, maka dibutuhkan iluminasi yang semakin besar.

Tabel 3.5 *Kebutuhan iluminasi*

	Kerja visual	Iluminan (lux)	Indeks kesilauan
1	Penglihatan biasa	100	28
2	Kerja kasar dengan detail besar	200	25-28
3	Kerja umum dengan detail wajar	400	25
4	Kerja yang lumayan keras dengan detail kecil (studio gambar, menjahit)	600	19-22
5	Kerja keras, lama, detail kecil (perakitan barang halus, menjahit dengan tangan)	900	16-22
6	Kerja sangat keras, lama, detail sangat kecil (pemotongan batu mulia, tisik halus, mengukur benda-benda sangat kecil	1.300-2.000	13-16
7	Kerja luar biasa keras dengan detail sangat kecil (arloji dan pembuatan instrumen)	2.000-3.000	10

3.4 Aspek Perancangan

Sub-bab ini akan memberikan pedoman perancangan yang perlu dipikirkan bila hendak memanfaatkan cahaya alami. Ingat bahwa setiap ruangan membutuhkan penerangan (iluminasi) umum berbeda-beda. Warna ruangan juga akan memberikan efek khas bagi ruangan tersebut.

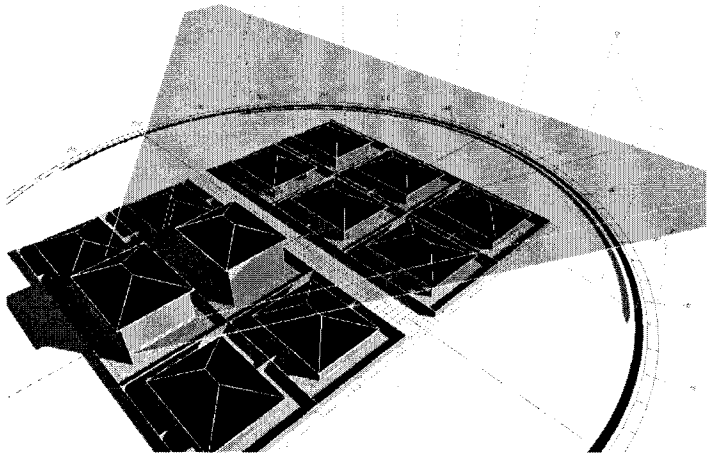
Harus selalu diingat bahwa cahaya matahari yang dipergunakan untuk menerangi ruangan adalah cahaya dari bola langit. Sinar-matahari-langsung hanya dipergunakan bila efek tertentu diperlukan, seperti kesehatan dan estetik. Pemakaian genting kaca, misalnya, dapat memberikan sentuhan artistik yang dihasilkan oleh sinar matahari yang menerabos kaca ke ruangan.

Bukaan (jendela) sebaiknya menghadap ke utara atau ke selatan untuk memperkecil kemungkinan sinar langsung matahari masuk ke dalam ruangan. Ingat pula bahwa menghindari sinar-matahari-langsung bukan berarti kita tidak boleh menatap ke langit. Tatapan ke langit biru dan awan-awannya pada saat-saat tertentu amat diperlukan untuk melepas pandangan dan mendekatkan pada alam. Membuat jendela selebar-lebarnya akan lebih menguntungkan daripada jendela sempit. Bila terlalu banyak cahaya maka dapat digunakan tirai untuk menutup sebagian jendela agar didapat penerangan yang sesuai dengan yang dikehendaki. Jendela timur dan barat perlu di-

lindungi tirai (di sisi luar) agar panas dan sinar matahari pagi dan sore hari yang tajam tidak mengganggu.

Bila dimungkinkan, letakkanlah bangunan di tengah tapak agar setiap sisi dapat memiliki pandangan keluar yang akan membantu masuknya cahaya ke dalam ruangan. Kalau tidak mungkin, usahakan ada *court* (halaman di tengah bangunan) untuk memasukkan cahaya. Usahakan ruangan tidak terlalu lebar agar cahaya alami dapat mencapai tengah ruangan.

Lakukan studi pandangan ke sekeliling untuk mengetahui penghalangan objek di sekeliling bangunan terhadap pandangan ke bola langit dan seberapa jauh objek tersebut menghalangi cahaya alami. Di Inggris hal ini diatur dengan undang-undang (*right to light*).



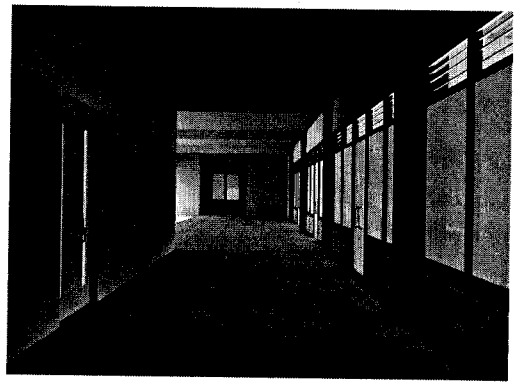
Gambar 3.8 *Analisis untuk hak-akan-cahaya (right to light) perlu dilakukan agar pembangunan tidak semena-mena dalam hal ketinggian bangunan sehingga melanggar hak azasi manusia untuk memperoleh akses ke cahaya alami (Satwiko, 2007)*

Saat ini tersedia beberapa pilihan untuk membantu cahaya langit dari bukaan di samping ruang agar dapat sampai di tengah ruang yang berjarak lebih dari tiga kali ketinggian efektif bukaan:

1. Memantulkan cahaya langit dengan cermin dari luar jendela ke langit-langit di tengah ruangan dengan risiko silau.
2. Memakai *light tube*; dengan risiko gangguan visual oleh tabung reflektor.

3. Memakai *fibre optic*; intensitas cahaya berkurang drastis.
4. Mengonversi cahaya langit menjadi listrik terlebih dahulu, dengan sel surya, kemudian mengubahnya menjadi cahaya kembali dengan lampu hemat energi yang ditaruh di tengah ruangan.

Dari keempat cara tersebut, mengonversi cahaya menjadi energi listrik terlebih dahulu kelihatannya lebih menarik karena listrik dapat disimpan sehingga pada saat mendungpun masih dapat diperoleh cahaya. Ketiga cara yang lain menarik dari segi psikologis karena memberikan cahaya yang dinamis, mengikuti intensitas di luar gedung.



Gambar 3.9 *Partisi ruang yang memang harus kedap bunyi dan ber-AC dapat dirancang sejak awal (kiri) menggunakan bahan tembus cahaya yang akan membantu cahaya alami masuk mencapai tengah ruangan (Satwiko, Ardi, 2007)*

3.5 Aspek Matematis

Pada bagian ini akan dibahas aspek matematis dari iluminasi, sinar matahari langsung, dan faktor cahaya siang hari.

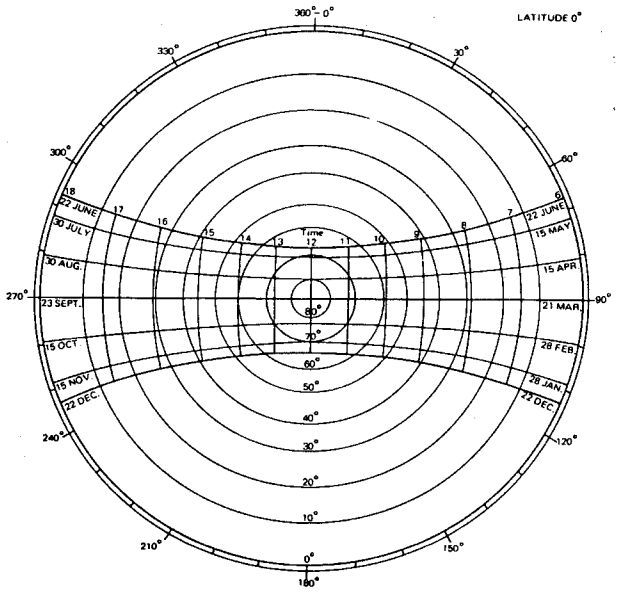
3.5.1 Iluminasi (dari sumber cahaya titik), E

$$\mathbf{E = I \cos\beta / d^2 \ lux.}$$

dengan E = Iluminasi, lux (lm/m^2)
I = Intensitas sumber cahaya ke arah titik yang disinari, lm
d = Jarak dari lampu ke titik di bidang yang disinari, m
β = Sudut datang sinar (dihitung antara garis tegak lurus bidang dan sinar)

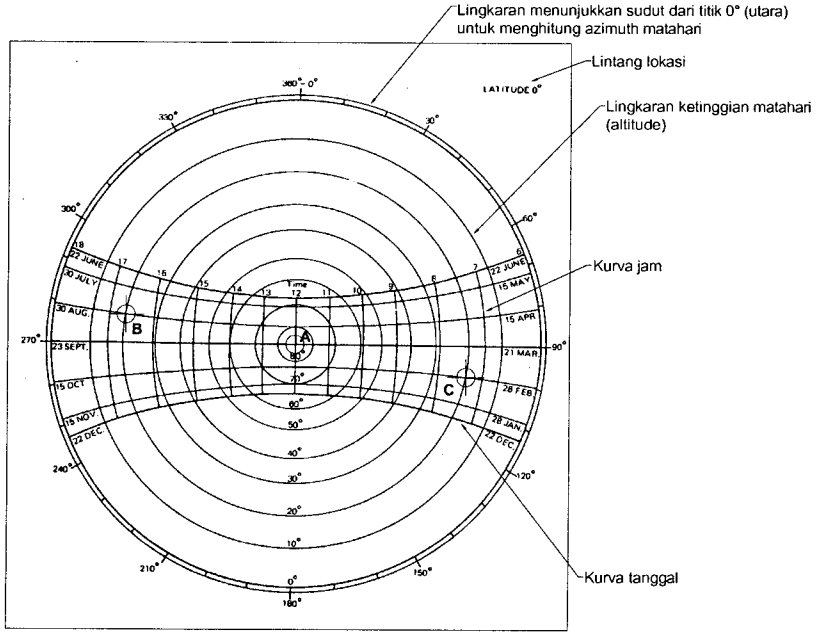
3.5.2 Sinar Matahari Langsung

Sinar-matahari-langsung tidak digunakan untuk pencahayaan ruang karena sangat menyilaukan dan membawa panas. Namun untuk mencapai efek tertentu dapat saja sinar-matahari-langsung dimasukkan ke dalam ruangan melalui bukaan asalkan terkendali. Sinar-matahari-langsung yang masuk ke dalam ruangan dapat diperkirakan dengan lingkaran surya (*sundial*), lihat ***Gambar 3.10***, untuk menghitung terlebih dahulu posisi matahari. Untuk menggunakannya amatlah mudah. Yang perlu diketahui adalah jam, tanggal serta lintang lokasi posisi matahari akan diukur. Kemudian orientasi bukaan, lebar bukaan, tinggi bukaan, serta halangan (overstek vertikal dan horizontal) akan menentukan seberapa lama dan dalam penetrasi sinar-matahari-langsung ke dalam ruangan. Sudut ketinggian matahari disebut *solar altitude angle* (g). Altitude digunakan untuk mengukur faktor vertikal bayangan. Sudut azimuth matahari (*solar azimuth angle*, a) adalah sudut antara proyeksi lingkaran tegak yang berpusat pada titik pelihat dan melalui matahari dan titik utara. Azimuth digunakan untuk menghitung faktor horizontal bayangan.



Gambar 3.10 *Lingkaran surya*

Setiap lokasi di bumi memiliki lingkaran surya berbeda, tergantung dari lintangnya. Lingkaran surya paling luar menunjukkan sudut dari titik 0, yaitu arah utara (Lihat ***Gambar 3.11***). Lingkaran terluar ini sekaligus menunjukkan ketinggian matahari 0°. Kemudian lingkaran sebelah dalam, berturut-turut menunjukkan ketinggian 10°, 20°, ... , hingga 90°. Dapat dilihat pada titik A, yaitu untuk lokasi yang berada di Lintang 0 seperti Pontianak, pada jam 12.00 tanggal 21 Maret dan 23 Desember matahari akan tepat di atas kepala (ketinggian 90°). Titik B menunjukkan bahwa pada lokasi di lintang 0, pada 15 April atau 30 Agustus, sekitar jam 16.40, matahari akan berada di ketinggian 20° dan azimuth 280°. Titik C menunjukkan untuk lokasi yang sama pada tanggal 28 Februari dan 15 Oktober sekitar yang 07.25, matahari akan berada di ketinggian 20° dan azimuth 100°.

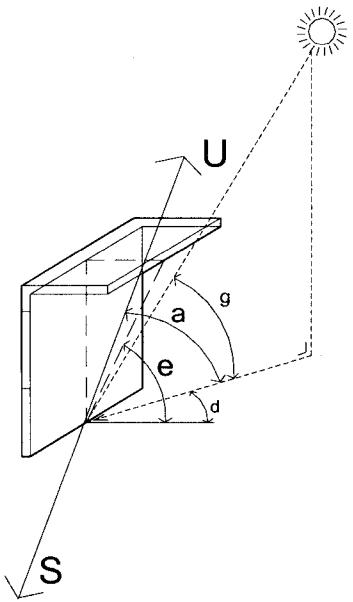


Gambar 3.11 *Lingkaran surya untuk lintang 0*

Bila sudut azimuth garis normal dinding sama dengan sudut azimuth matahari (a), maka altitude (g) dapat dipakai langsung untuk memperkirakan faktor vertikal bayangan. Namun bila sudut azimuth garis normal dinding tidak sama dengan sudut azimuth matahari, maka faktor vertikal bayangan dihitung dengan rumus:

tan e = tan g x sec d

(Bila kalkulator Anda tidak memiliki sec, ingat bahwa sec adalah 1/cos !)



***Gambar 3.12** Sudut-sudut untuk mencari bayangan*

3.5.3 Faktor Cahaya Siang Hari (*Daylight Factor*), DF

$DF = E_i/E_o \times 100\%$

dengan DF = *Daylight Factor*
E_i = iluminasi pada satu titik di dalam ruangan
E_o = iluminasi di ruang luar oleh cahaya bola langit yang tidak terhalang

Konsep DF hanya valid untuk kondisi bola langit yang tercahayai secara merata (*overcast*) dan tidak ada sinar langsung dari matahari. DF akan terpengaruh oleh tiga komponen, yaitu komponen langit (*SC, sky component*), komponen pantulan permukaan luar (*ERC, externally reflected component*), dan komponen pantulan permukaan dalam ruangan (*IRC, internally reflected component*).

DF = SC + ERC + IRC

SC adalah komponen cahaya bidang langit yang terlihat dari titik yang diukur. Oleh karena itu SC ditentukan oleh bidang jendela dan halangan di luar. ERC adalah komponen cahaya bidang permukaan penghalang di luar yang terlihat dari titik yang diukur di dalam ruangan. Tingkat pantulan permukaan ini akan memengaruhi ERC. IRC adalah komponen cahaya yang berasal dari pantulan permukaan dalam ruangan.

Untuk menemukan nilai DF suatu titik di dalam ruangan, kita dapat memakai Busur Cahaya Siang Hari (*Daylight Protactor*) No. 2 Seri 2, yang diterbitkan oleh Building Research Station. Sebenarnya ada dua seri busur. Seri 1 untuk langit dengan luminan merata, Seri 2 untuk langit CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) yaitu langit dengan distribusi tidak merata menurut rumus:

$L_y = L_h(1+2\sin y)$

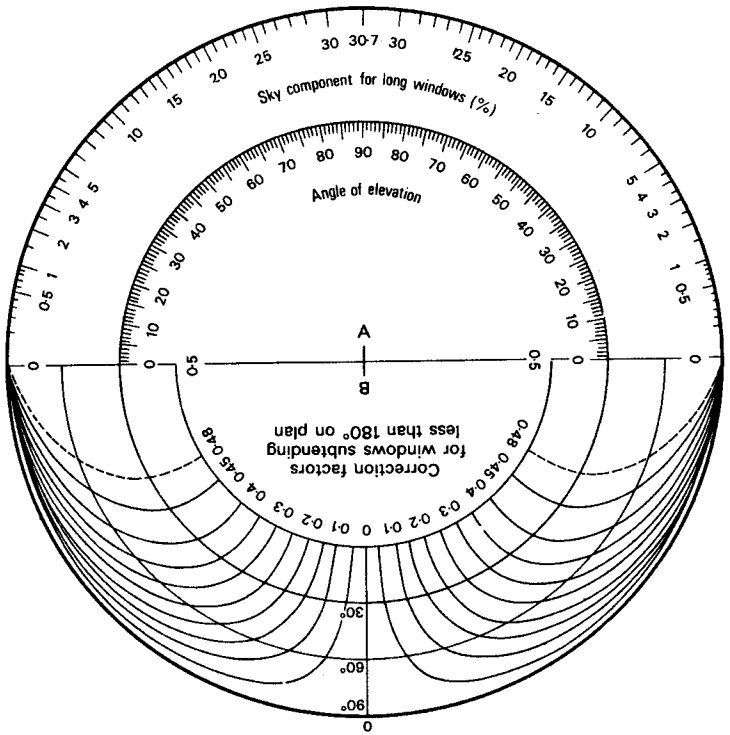
dengan L_y = luminan di sudut ketinggian y
L_h = luminan di horizon

Dengan demikian, di zenith $L_z = 3L_h$ (Ingat $\sin(90^\circ) = 1$)

Langkah-langkah untuk menggunakan busur dan nomogram adalah sebagai berikut (Sumber: O.H. Koenigsberger):

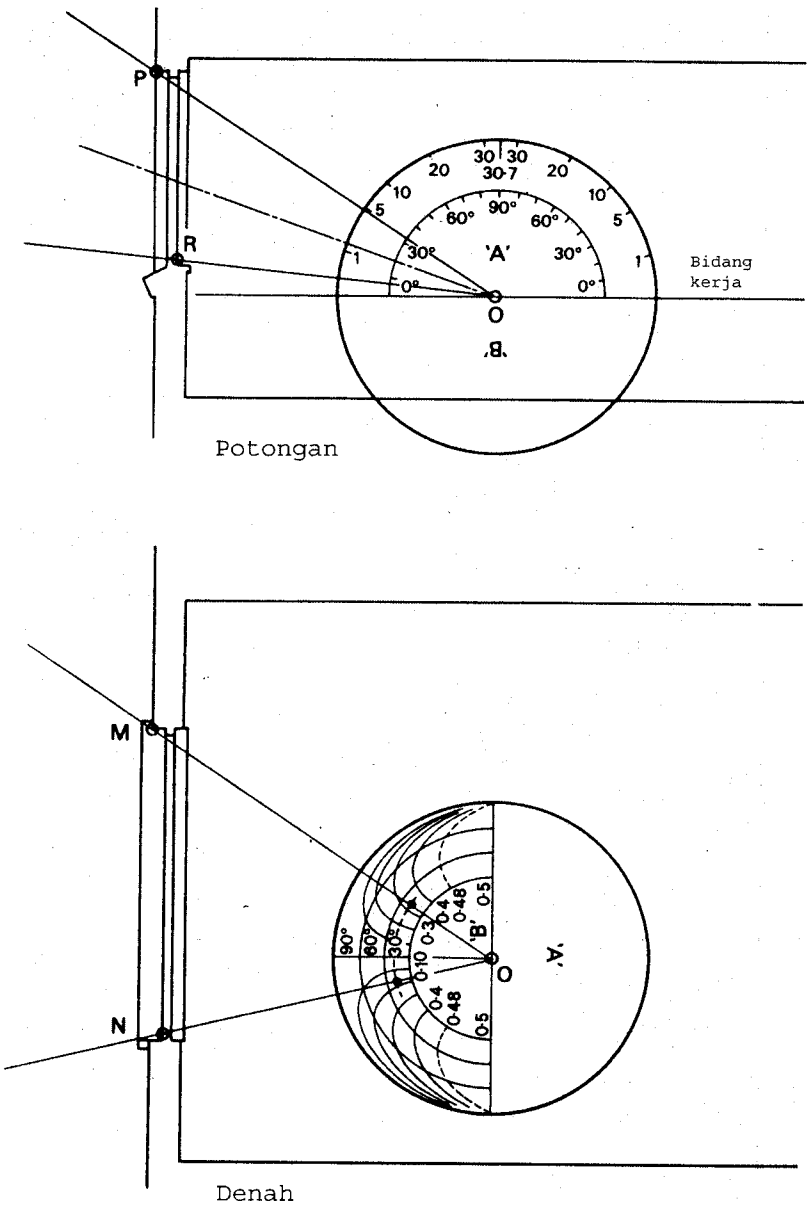
A. Mencari Komponen Langit (SC, *Sky component*)

1. Buatlah potongan tegak ruangan yang melalui jendela dan titik yang akan diukur DF-nya (misalnya titik O), dan juga denah ruangan tersebut.
2. Tariklah garis dari batas-batas bukaan ke titik O, misalnya dari garis PO dan RO. Kalau di luar ada penghalang, misalnya banguan lain, maka ujung atas penghalang tadi menjadi batas bukaan. Garis RO ditarik dari ujung atas bangunan penghalang ke titik O.
3. Letakkanlah busur secara tegak dengan skala A menghadap ke atas dan garis tengah busur sejajar dengan garis bidang kerja. Titik pusat busur pada titik O.



Gambar 3.13 *Busur surya (fotokopilah pada plastik transparan untuk diletakkan pada gambar potongan dan denah ruang yang hendak diukur)*

4. Bacalah angka skala di lingkaran luar yang dipotong oleh garis PO dan RO. Perbedaan kedua angka tersebut adalah Komponen Langit Awal (ISC, *Initial Sky Component*).
5. Bacalah angka skala di lingkaran dalam yang dipotong oleh garis PO dan RO. Hitunglah rata-ratanya.
6. Ambillah denah dan tandailah titik O tadi.
7. Buatlah garis yang menghubungkan batas-batas bukaan dengan titik O, misalnya kita namakan garis MO dan NO.
8. Sekarang letakkan busur pada denah dengan skala B menghadap ke bukaan. Garis tengah busur sejajar dengan bidang bukaan. Titik pusat busur pada titik O.



Gambar 3.14 *Peletakan busur pada potongan dan denah ruangan*

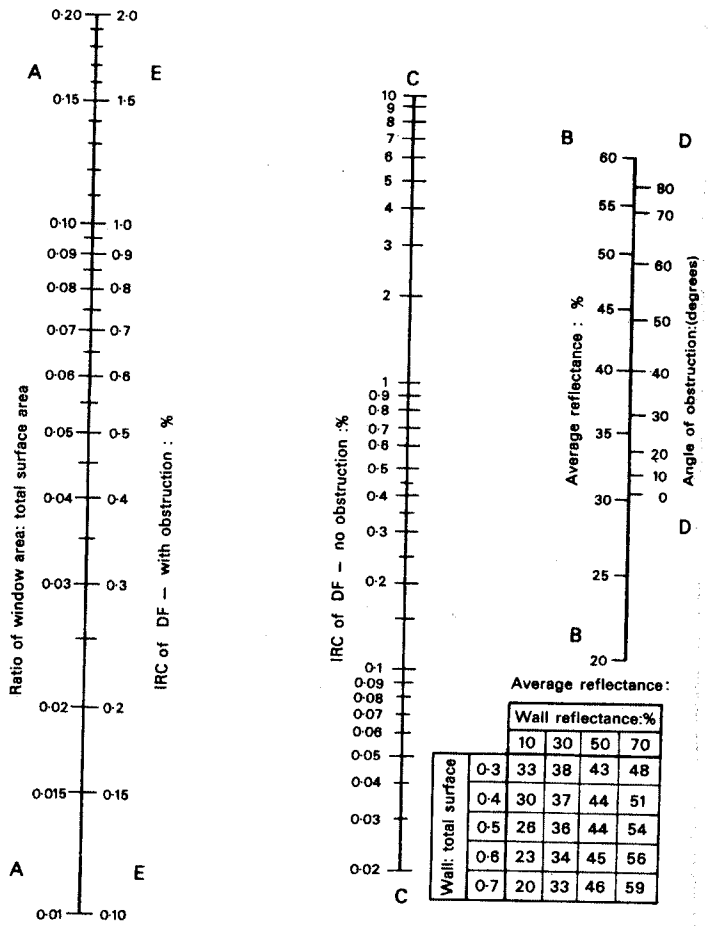
9. Pada busur ada 4 setengah-lingkaran: 0°, 30°, 60° dan 90°. Pilihlah salah satu yang sesuai dengan sudut yang ditemukan di langkah 5. Bila tidak ada yang sesuai, interpolasikan dan buatlah setengah-lingkaran imajiner.
10. Di titik-titik MO dan NO memotong setengah-lingkaran tadi, bacalah skala garis-garis lengkung yang ditunjukkan pada perpotongan garis lengkung dengan setengah-lingkaran paling dalam.
11. Bila titik-titik perpotongan berada di kedua sisi garis tengah, jumlahkanlah. Bila kedua titik berada di salah satu sisi, hitunglah selisihnya. Angka yang Anda dapat adalah Faktor Koreksi (CF, *Correction Factor*).
12. Kalikanlah Komponen Langit Awal (*Initial Sky Component*) yang ditemukan di langkah 4 dengan Faktor Koreksi (*Correction Factor*) untuk memperoleh Komponen Langit (*Sky Component*).

B. Mencari Komponen Pantulan Luar (ERC, *Externally Reflected Component*)

Bila ada penghalang di luar, carilah SC dari bagian langit yang terhalang dengan cara yang sama dengan langkah di atas, kemudian kalikanlah dengan rata-rata pantulan permukaan penghalang tadi, atau nilai 0,2. Jadi bila ada penghalang di luar, kita menghitung dua langkah. Langkah pertama menghitung SC bagian langit yang tidak terhalang, langkah kedua menghitung SC dari bagian langit yang terhalang, kemudian mengalikannya dengan rata-rata pantulan permukaan penghalang tadi.

C. Mencari Komponen Pantulan Dalam (IRC, *Internally Reflected Component*)

1. Hitunglah luas bukaan dan luas permukaan ruangan keseluruhan (lantai, langit-langit, dan dinding, termasuk bukaan). Kemudian hitunglah perbandingan antara luas permukaan dan luas permukaan ruangan keseluruhan. Carilah letak harga perbandingan tersebut di skala A pada nomogram.
2. Hitunglah luas seluruh dinding, kemudian hitunglah perbandingan antara luas dinding dan luas permukaan keseluruhan. Carilah harga perbandingan tersebut pada kolom pertama tabel kecil (di sisi kanan bawah nomogram).



Gambar 3.15 Nomogram

3. Letakkan nilai pantulan dinding pada deret atas tabel kecil dan bacalah rata-rata pantulan permukaan dengan cara memotongkan nilai pada kolom dan nilai pada deret (interpolasikan secara vertikal maupun horizontal bila harga-harga tidak pas dengan yang tersedia di tabel kecil). Catatan: Tabel kecil mengasumsikan pantulan langit-langit 0,7 dan pantulan lantai 0,15.
4. Taruhlah harga pantulan rata-rata yang ditemukan di langkah 3 pada skala B dan buatlah garis lurus ke skala A tepat di titik yang ditemukan pada langkah 1.

5. Garis di atas akan memotong skala C. Bacalah nilai di titik perpotongan tadi. Itulah harga rata-rata IRC bila di luar tidak ada penghalang.
6. Bila ada penghalang luar, hitunglah sudut penghalang tadi dari garis horizontal yang diukur dari tengah bukaan (jendela). Taruhlah harga sudut tersebut di skala D.
7. Tariklah garis lurus dari titik di skala D melalui titik di skala C terus ke skala E. Perpotongan garis tersebut dengan skala E adalah nilai rata-rata IRC bila ada penghalang luar.

Kita tidak dapat mengharapkan permukaan dalam ruangan selalu bersih dan nilai pantulan cahayanya selalu sama sejak baru. Ada penurunan kualitas permukaan dalam ruangan sehingga IRC perlu dikalikan dengan Faktor Perawatan (*Maintenance Factor*) 0,75 atau menurut tabel berikut:

Tabel 3.6 *Faktor perawatan (Maintenance Factor, MF)*

Jenis lokasi	Jenis pekerjaan	Faktor Perawatan
Bersih	Bersih	0,9
Kotor	Bersih	0,8
Bersih	Kotor	0,7
Kotor	Kotor	0,6

IRC minimum dapat diperoleh dengan mengalikan IRC rata-rata (setelah dikalikan dengan Faktor Perawatan) dengan Faktor Konversi (*Conversion Factor*) yang tergantung dari pantulan rata-rata sesuai tabel berikut:

Tabel 3.7 *Conversion Factor, CF*

Pantulan rata-rata	Faktor Konversi
0,3	0,54
0,4	0,67
0,5	0,78
0,6	0,85

Dengan demikian kita telah memperoleh DF dari penjumlahan SC + ERC + IRC. Namun DF masih harus dikalikan lebih lanjut dengan tiga faktor koreksi: GF (*glazing*), FF (*framing*), dan D (*dirt on glass*). Apabila tanpa kaca atau memakai kaca bening maka GF = 1. Kaca lain memiliki GF yang biasanya disertakan dalam data teknis oleh pabrik pembuat kaca. Sebagai acuan nilai GF pada tabel berikut dapat dipakai:

Tabel 3.8 *Glazing Factor, GF*

Jenis kaca	GF
Kaca berkawat	0,95
Kaca baur atau berpola	0,90-0,95
Kaca berpenyerap panas	0,60-0,75
Kaca serat tembus cahaya atau plastik akrilik	0,65-0,90

Nilai FF dapat dihitung sebagai perbandingan antara luas kaca bersih dan lubang bukaan, namun pada umumnya dapat dipakai FF = 0,75. Bila kaca tidak mempunyai rangka sama sekali, kaca utuh, maka FF = 1.

Nilai D tergantung dari jenis lokasi, frekuensi pembersihan, dan posisi kaca. Kaca mendatar atau miring lebih mudah kotor daripada kaca tegak.

Tabel 3.9 *Dirt, D*

Lokasi	Vertikal	Miring	Horizontal
Bersih	0,9	0,8	0,7
Industrial	0,7	0,6	0,5
Sangat kotor	0,6	0,5	0,4

3.6 Contoh-contoh Perhitungan

Berikut ini akan diberikan beberapa contoh perhitungan, di antaranya berkaitan dengan iluminan titik di dalam ruang, menggambar bayangan oleh sinar matahari, dan menghitung faktor cahaya siang hari, DF.

3.6.1 Menghitung Iluminan Titik di dalam Ruangan

Soal:

Bila diketahui DF satu titik di dalam ruangan adalah 10%, berapakah iluminan di titik tersebut (E_i) bila iluminan di luar ruangan (E_o) ketika diukur menunjukkan 8000 lux.

Jawab:

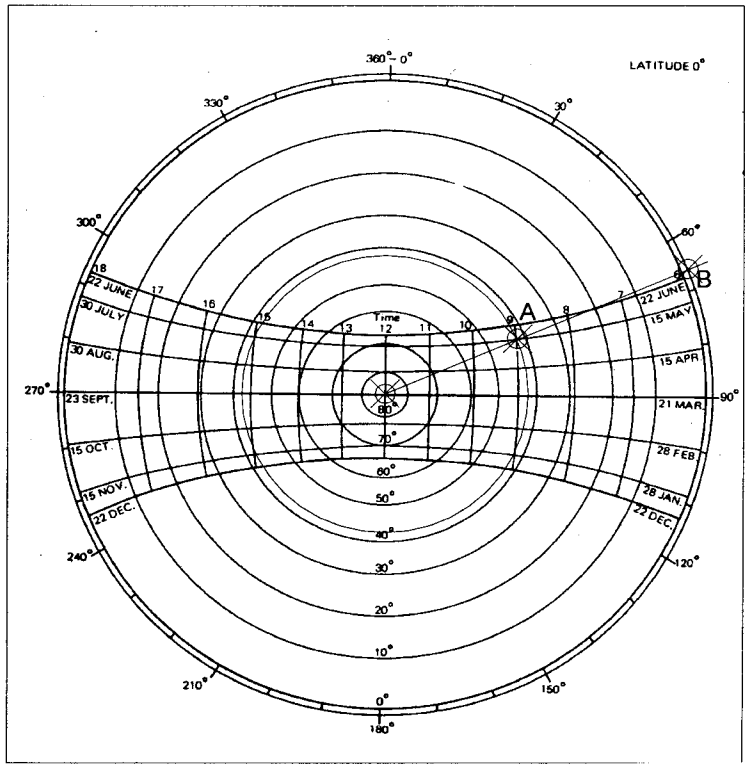
$$DF = E_i/E_o \times 100\% \text{ lux}$$
$$10/100 = E_i/8000$$
$$E_i = 0{,}1 \times 8000 \text{ lux}$$
$$= 800 \text{ lux}$$

3.6.2 Menggambar Bayangan oleh Sinar Matahari

Soal:

Sebuah dinding mempunyai lebar 3 m dan tinggi 2 m (dihitung dari sisi luar). Dinding tersebut dikelilingi oleh dinding pembayang (*shading*) selebar 0,6 m. Pada dinding tersebut terdapat jendela kaca dengan ketinggian ambang bawah 0,8 m. Jarak ambang jendela kiri, kanan, dan atas dari dinding pembayang adalah 0,2 m.

1. Jika jendela tersebut terletak di garis katulistiwa dan menghadap ke timur, gambarlah bayangan yang dibuat oleh dinding pembayang pada tanggal 15 Mei jam 9.00 pagi.
2. Seperti soal 1, tetapi azimuth garis normal dinding 105°.

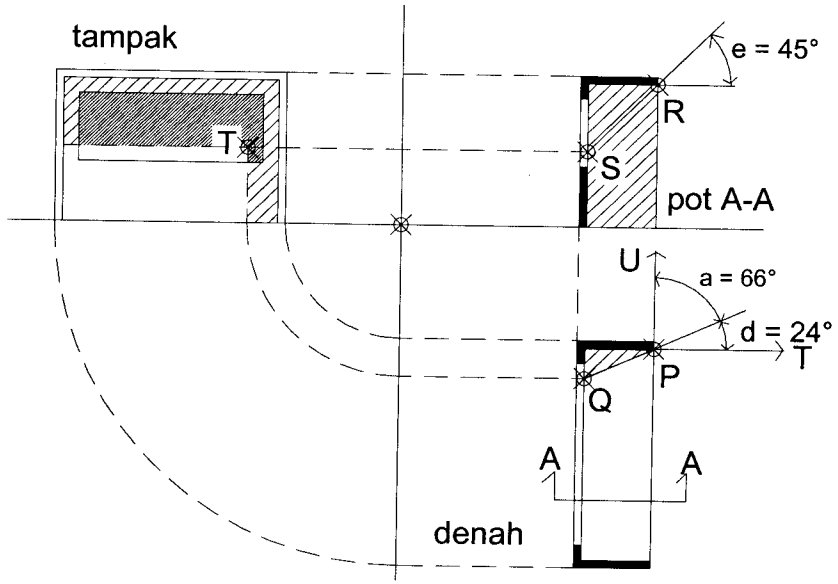


Gambar 3.16 *Lingkaran surya untuk soal nomor 1*

Jawaban untuk soal 1:

A. Ambil busur surya yang sesuai, yaitu untuk altitude (lintang) 0°. Tandailah titik perpotongan antara kurva tanggal 15 Mei dan jam 9.00 dan namai sebagai titik A. Buatlah lingkaran yang melalui titik A. Kita temukan bahwa altitude matahari (g) = **42°**. Kemudian, tarik garis dari titik pusat lingkaran melalui titik A dan dilanjutkan hingga memotong lingkaran terluar di titik B. Kita temukan sudut azimuth matahari (a) = **66°**.

B. Buatlah tampak, denah dan potongan dinding seperti Gambar 3.17.



Gambar 3.17 *Gambar tampak, denah, dan potongan dinding soal nomor 1*

Kita akan mencari faktor horizontal bayangan. Karena kita tahu bahwa posisi matahari ada di sebelah utara garis normal dinding, maka dinding pembayang utara yang akan memberi bayangan. Oleh karena itu buatlah titik P pada ujung dalam dinding pembayang. Letakkanlah azimuth pada P. Karena dinding tepat menghadap ke timur maka sudut azimuth garis normal dinding adalah 90°. Dengan demikian d = 90° – 66° = **24°**.

Untuk menghitung faktor bayangan tegak memakai rumus:

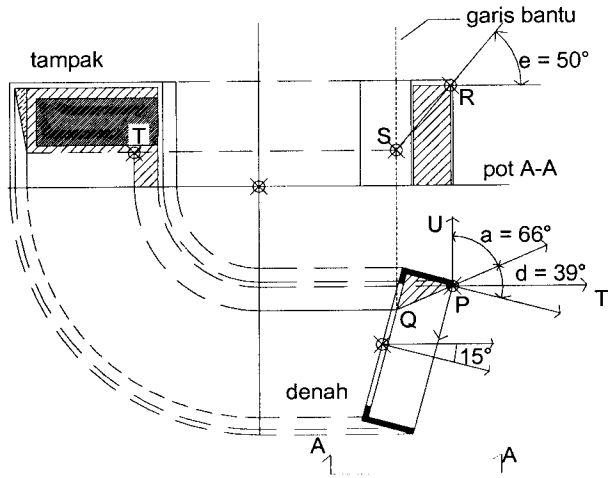
$$\begin{aligned} \tan e &= \tan g \times \sec d \\ &= \tan 42 \times \sec 24 \\ &= 0{,}9 \times 1{,}1 \\ &= 0{,}99 \\ e &= \mathbf{45^o} \end{aligned}$$

Letakkan sudut e pada ujung dalam tritisan dan namai sebagai titik R. Teruskanlah garis sudut e hingga memotong dinding di S. Hal yang sama, teruskan garis sudut d hingga memotong dinding di Q. Kemudian proyeksikan S dan Q ke tampak. Mereka bertemu di titik T. Dengan demikian kita telah menemukan garis bayangan di dinding. (Sebenarnya titik S dan Q adalah titik T yang dilihat dari samping dan atas!)

Jawaban soal 2:

A. Karena jam dan tanggal sama dengan soal nomor 1, maka kita gunakan hasil g = 42° dan a = 66°.

B. Buatlah denah, tampak dan potongan seperti ***Gambar 3.18***. Azimuth garis normal dinding adalah 105°. Letakkan titik P pada ujung dinding pembayang. Gambarkanlah pada titik P sudut azimuth matahari (a) = 66°. Teruskan garis azimuth matahari hingga memotong dinding di titik Q. Buatlah garis bantu dari titik Q tegak lurus ke arah POT A-A.



Gambar 3.18 *Gambar tampak, denah, dan potongan dinding soal nomor 2*

Karena azimuth garis normal dinding 105° maka kita dapat menghitung d = 105° – 66° = **39°**. Untuk menghitung faktor bayangan tegak, digunakan rumus:

$$\begin{aligned} \tan e &= \tan g \times \sec d \\ &= \tan 42 \times \sec 39 \\ &= 0{,}9 \times 1{,}3 \\ &= 1{,}2 \\ e &= \mathbf{50^o} \end{aligned}$$

Letakkan sudut e = 50° pada ujung dalam tritisan dan namai sebagai titik R. Teruskanlah garis sudut e hingga memotong garis bantu dari Q tadi di titik S. Kemudian proyeksikan S dan Q ke tampak. Mereka bertemu di titik T. Dengan demikian kita telah menemukan garis bayangan di dinding. Sebenarnya titik S dan Q adalah titik T yang dilihat dari samping dan atas!

3.6.3 Menghitung Faktor Cahaya Siang Hari, DF

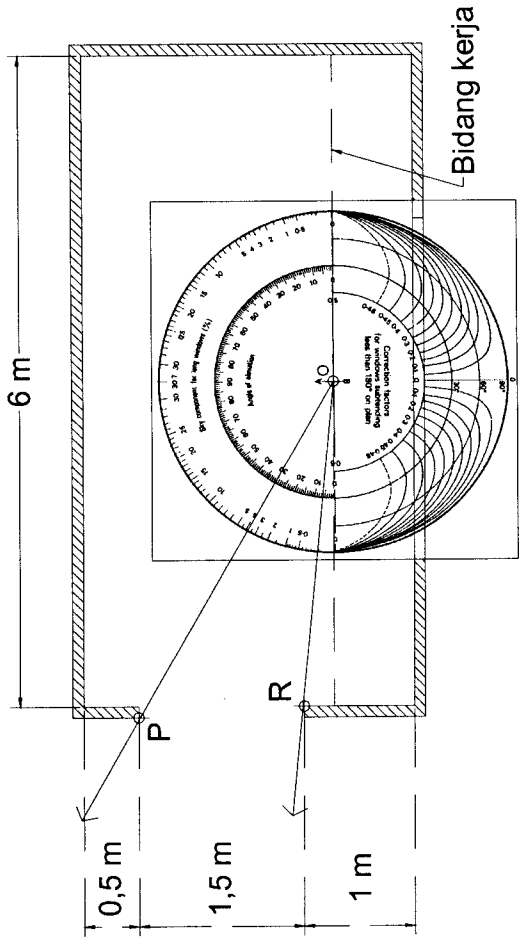
Soal:

Sebuah ruangan berukuran lebar 4 m, panjang 6 m dan tinggi 3 m. Sebuah jendela berukuran tinggi 1,5 m dan lebar 2 m terletak di sisi melebar ruangan. Ketinggian ambang bawah jendela 100 cm dari lantai. Titik O berada sejauh 3 m dari jendela dan persis di tengah kedua dinding memanjang. Ruang ada di lokasi yang relatif bersih dan digunakan untuk kegiatan yang relatif bersih juga.

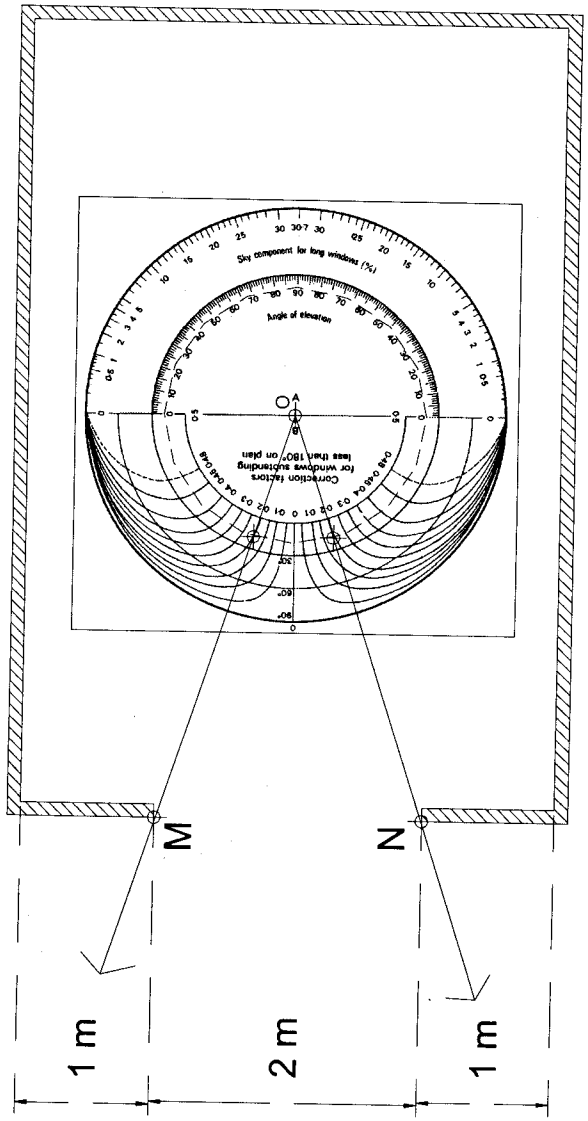
1. Hitunglah DF di titik O, bila di luar tidak ada penghalang, dan jendela tanpa kaca.
2. Hitunglah DF di titik O, bila di luar tidak ada penghalang, dan jendela berkaca berpola.
3. Hitunglan DF di titik O, bila di luar ada penghalang yang terletak 3m dari jendela dengan tinggi 2,5m. Jendela berkaca. Pantulan rata-rata penghalang di luar 0,7 (cat berwarna terang).

Jawaban untuk soal 1:

$$DF = SC + ERC + IRC$$



Gambar 3.19 *Potongan dan denah ruangan apabila di luar tidak ada penghalang*



Gambar 3.20 *Potongan dan denah ruangan apabila di luar tidak ada penghalang*

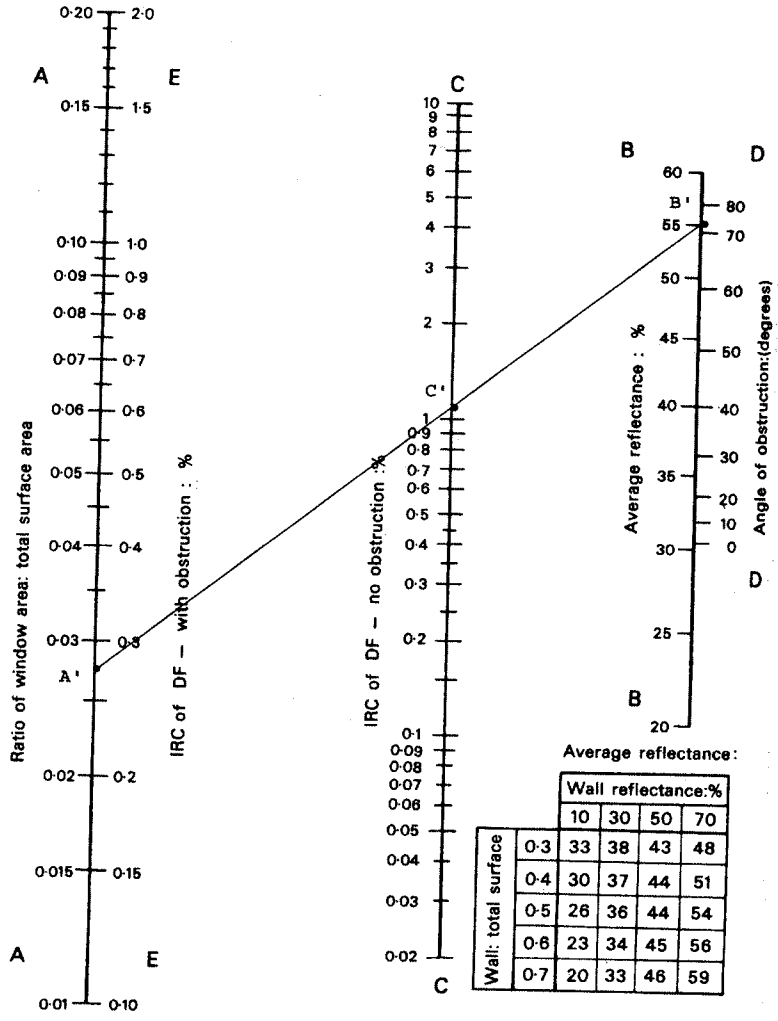
A. Menghitung SC

1. Buatlah potongan tegak ruangan yang melalui jendela dan titik O.
2. Tarik garis dari titik O ke ambang atas dan bawah jendela dan namai garis tersebut PO dan RO.
3. Letakkan busur secara tegak (A menghadap ke atas) dengan titik tengah busur berimpit dengan titik O. Garis tengah busur sejajar dengan bidang kerja yang sejajar lantai dan melalui titik O.
4. PO memotong skala lingkaran luar di busur pada titik 3,75% dan RO pada titik 0,1%. Dengan demikian Komponen Langit Awal (ISC) sama dengan 3,75%-0,1% atau 3,65%.
5. PO memotong skala lingkaran dalam di busur pada titik 30°, sedang RO pada titik 6°. Rata-rata dari kedua nilai tersebut adalah 18°.
6. Buatlah denah ruangan dan tandailah letak titik O.
7. Buatlah garis dari titik O ke tepi jendela, namailah garis MO dan NO.
8. Letakkan busur pada denah dengan skala B menghadap ke jendela.
9. Pada langkah 5 di atas ditemukan sudut 18°. Di skala B tidak ada setengah-lingkaran untuk skala 18°. Oleh karena itu buatlah setengah-lingkaran imajiner 18°.
10. Tandailah perpotongan antara garis MO dan NO dengan setengah-lingkaran 18°. Ternyata kedua titik perpotongan tadi kira-kira sangat berdekatan dengan garis lengkung 0,2. Jumlahkan kedua titik untuk menemukan Faktor Koreksi (CF), yaitu 0,2 + 0,2 sama dengan 0,4.
11. Maka Komponen Langit (SC) = Komponen Langit Awal (ISC) x Faktor Koreksi (CF) = 3,65 % x 0,4 = **1,46%**.

B. Pada soal 1, ERC tidak dihitung karena tidak ada penghalang di luar.

C. Menghitung IRC

1. Luas jendela = 1,5 x 2 = 3 m^2. Luas dinding = 2 x (3 x 4) m^2 + 2 x (3 x 6) m^2 = 60 m^2. Luas lantai = 4 x 6 m^2 = 24 m^2. Luas langit-langit = 4 x 6 m^2 = 24 m^2. Jadi luas total permukaan ruang = (60 + 24 + 24) m^2 = 108 m^2. Perbandingan antara luas jendela dan luas total permukaan ruang = 3 : 108 = 0,027. Tandailah titik 0,027 pada skala A nomogram sebagai A'.



Gambar 3.21 Nomogram

2. Perbandingan antara luas dinding dan luas total permukaan ruang = 60 : 108 = 0,56. Tandailah letak nilai 0,56 pada kolom kiri tabel kecil.
3. Diketahui nilai pantulan dinding 70%. Oleh karena itu bacalah pantulan rata-rata dengan cara menemukan perpotongan antara kolom 70 dan deret 0,56. Karena tidak tersedia deret untuk 0,56 maka perlu interpolasi. Ditemukan nilai pantulan rata-rata sekitar 55%.

4. Taruhlah harga 55% pada skala B (beri nama B') dan tariklah garis lurus ke titik A' di skala A yang ditemukan pada langkah 1 di atas.
5. Garis di atas akan memotong skala C di titik C', kira-kira, **1,2%**. Itulah nilai IRC.

Karena ruangan ada di lokasi bersih dan kegiatan di dalamnya juga bersih, maka Faktor Perawatan (MF) = 0,9 (lihat ***Tabel 3.6***). Kemudian faktor konversi (CF) pantulan untuk pantulan rata-rata 55% adalah sekitar 0,82 (lihat ***Tabel 3.7***). Dengan demikian IRC minimum = (1,2 x 0,9 x 0,8)% = 0,9 %. Jadi di titik O nilai DF = SC + ERC + IRC = (1,46 + 0 + 0,9)% = 2,36%. Ini bermakna, bila langit di luar cerah dan titik di luar ruangan memperoleh iluminasi 10.000 lux, maka titik O akan memperoleh 2,36%x10.000 lux = **236 lux**. Iluminasi sebesar itu tidak terlalu terang namun cukup untuk sekadar menerangi ruang kerja secara umum dan kerja dengan detail yang agak besar (Lihat ***Tabel 3.5***). (Catatan: Pengalaman penulis, standar kebutuhan iluminasi yang ditemui di buku-buku acuan dari negara maju lebih tinggi dari yang diperlukan, sekitar 50 lux lebih tinggi. Jadi untuk ukuran orang Indonesia, 236 lux sudah cukup terang untuk membaca dan menulis.)

Jawaban untuk soal 2:

Pada soal 2 jendela berkaca menyebabkab DF perlu dikoreksi lebih lanjut sesuai jenis kaca (GF), rangka (FF) dan tingkat kekotoran lokasi (D). Untuk jenis kaca berpola GF = 0,9 (lihat ***Tabel 3.8***). Karena kaca tidak diperkuat dengan rangka di tengah maka FF menggunakan nilai 1,0. Kondisi lokasi bersih dan kaca tegak, maka D = 0,9 (lihat ***Tabel 3.9***). DF setelah koreksi lebih lanjut = (DF tanpa kaca x GF x FF x D)% = (2,36 x 0,9 x 1,0 x 0,9)% = 1,91%.

Ini bermakna bila titik di luar memperoleh iluminasi 10.000 lux, maka titik O akan memperoleh 1,91%x10.000lux = **191 lux**. Jadi pemasangan kaca akan menyebabkan DF berkurang. (Catatan: Angka koreksi yang memerhitungkan kekotoran lingkungan dimaksudkan untuk mengantisipasi penurunan cahaya yang menembus kaca dalam perjalanan waktu akibat debu dan lain-lain. Jadi tidak terjadi serta merta.)

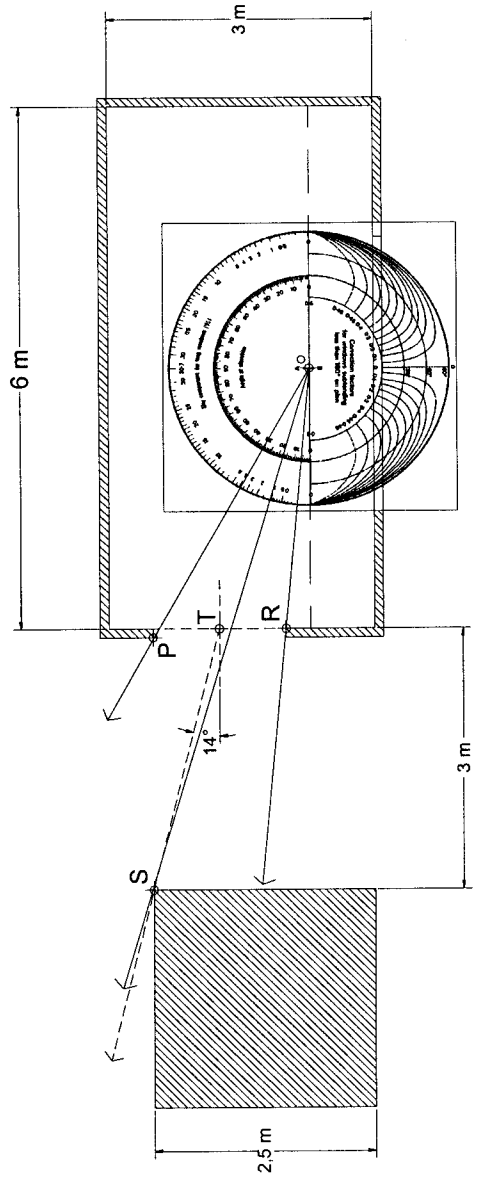
Jawaban untuk soal 3.

Untuk menjawab soal 3, selain mencari SC dan IRC, kita juga perlu mencari ERC. SC dihitung berdasarkan bola langit yang tidak tertutup oleh

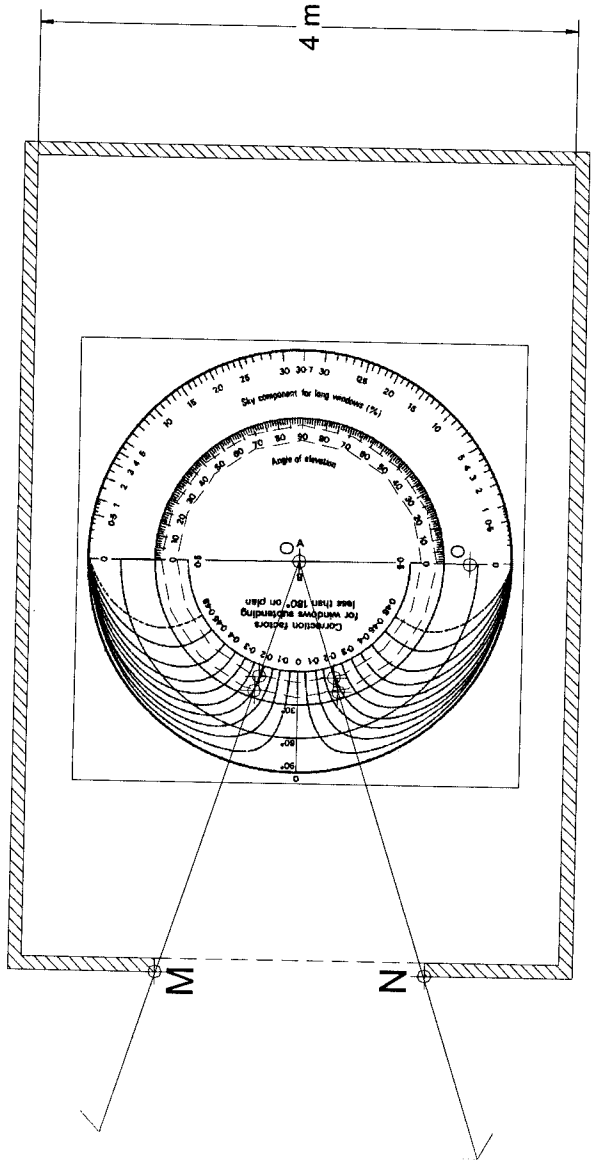
penghalang. IRC dihitung menurut bagian bola langit yang tidak terhalang terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan untuk menemukan IRC bila ada penghalang. ERC juga dihitung dengan cara menghitung bagian bola langit yang tertutup oleh penghalang seolah-olah tidak terhalang, kemudian disesuaikan dengan pantulan permukaan penghalang tersebut.

A. Menghitung SC

1. Buatlah potongan tegak ruangan yang melalui jendela dan titik O.
2. Tarik garis dari titik O ke rangka atas jendela dan ujung atas penghalang di luar dan namai garis tersebut PO dan SO.
3. Letakkan busur secara tegak (A menghadap ke atas) dengan titik tengah busur berimpit dengan titik O. Garis tengah busur sejajar dengan bidang kerja yang sejajar lantai dan melalui titik O.
4. PO memotong skala lingkaran luar di busur pada titik 3,75% dan SO pada titik 1,0%. Dengan demikian Komponen Langit Awal sama dengan 3,75%-1,0% atau 2,75%.
5. PO memotong skala lingkaran dalam di busur pada titik 30°, sedangkan SO pada titik 17°. Rata-rata dari kedua nilai tersebut adalah 23,5°.
6. Buatlah denah ruangan dan tandailah letak titik O.
7. Buatlah garis dari titik O ke tepi jendela, namailah garis MO dan NO.
8. Letakkan busur pada denah dengan skala B menghadap ke jendela.
9. Pada langkah 5 di atas ditemukan sudut 23,5°. Di skala B tidak ada setengah-lingkaran untuk skala 23,5°. Oleh karena itu buatlah setengah-lingkaran imajiner 23,5°.
10. Tandailah perpotongan antara garis MO dan NO dengan setengah-lingkaran 23,5°. Ternyata kedua titik perpotongan tadi kira-kira sangat berdekatan dengan garis lengkung 0,18. Jumlahkan kedua titik untuk menemukan Faktor Koreksi, yaitu 0,18 + 0,18, sama dengan 0,36.
11. Maka Komponen Langit (SC) = Komponen Langit awal x Faktor Koreksi 2,75%x0,36 = **0,99%**.



Gambar 3.22 *Potongan dan denah ruangan, apabila di luar ada penghalang*



Gambar 3.23 *Potongan dan denah ruangan, apabila di luar ada penghalang*

B. Menghitung ERC

Untuk menghitung ERC kita mulai dari menghitung SC bagian bola langit yang tertutup oleh penghalang (seolah-olah tidak tertutup!).

1. Dengan memakai gambar potongan untuk menghitung SC di atas, buatlah garis RO, yaitu dari titik O ke rangka bawah jendela.
2. SO memotong skala lingkaran luar di busur pada titik 1,0% dan RO pada titik 0,01%. Dengan demikian Komponen Langit Awal sama dengan 1,0%-0,01% atau 0,99%.
3. SO memotong skala lingkaran dalam di busur pada titik 17°, sedang RO pada titik 6°. Rata-rata dari kedua nilai tersebut adalah 11,5°.
4. Buatlah denah ruangan dan tandailah letak titik O.
5. Buatlah garis dari titik O ke tepi jendela, namailah garis MO dan NO.
6. Letakkan busur pada denah dengan skala B menghadap ke jendela.
7. Pada langkah 5 di atas ditemukan sudut 11,5°. Pada skala B tidak ada lingkaran-setengah untuk skala 11,5°. Oleh karena itu buatlah lingkaran-setengah imajiner 11,5°.
8. Tandailah perpotongan antara garis MO dan NO dengan lingkaran-setengah 11,5°. Ternyata kedua titik perpotongan tadi kira-kira sangat berdekatan dengan garis lengkung 0,2. Jumlahkan kedua titik untuk menemukan Faktor Koreksi, yaitu 0,2 + 0,2, sama dengan 0,4.
9. Maka Komponen Langit (SC) bila tidak terhalangi = Komponen Langit Awal x Faktor Koreksi = 0,99%x0,4 = 0,396%.
10. ERC = SC bila tidak terhalangi x pantulan rata-rata penghalang = 0,396% x 0,7 = **0,277%**.

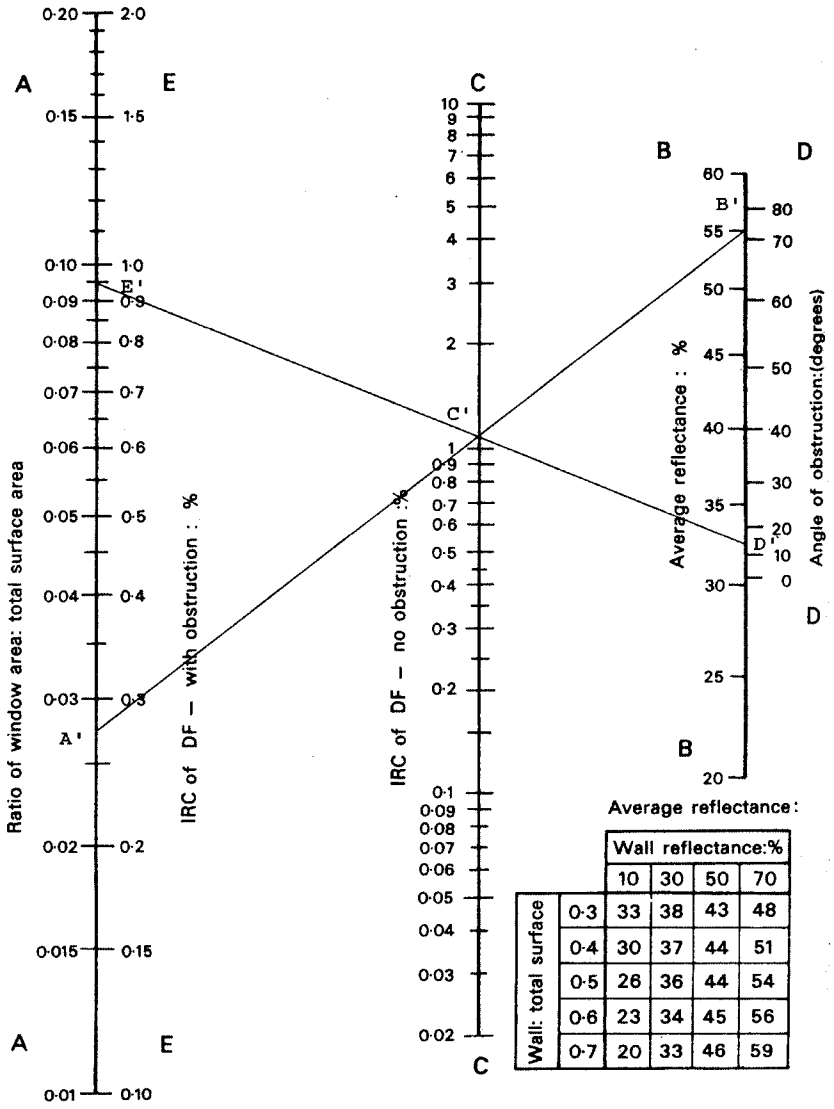
C. Menghitung IRC

1. Luas jendela = 1,5 m x 2 m = 3 m^2. Luas dinding = 2 x (3 x 4) m^2 + 2 x (3 x 6) m^2 = 60 m^2. Luas lantai = 4 x 6 m^2 = 24 m^2. Luas langit-langit = 4 x 6 m^2 = 24 m^2. Jadi luas total permukaan ruang = (60 + 24 + 24) m^2 = 108 m^2. Perbandingan antara luas jendela dan luas total permukaan ruang = 3/108 = 0,027. Tandailah titik 0,027 pada skala A nomogram (titik A').

2. Perbandingan antara luas dinding dan luas total permukaan ruang = 60/108 = 0,56. Tandailah letak nilai 0,56 pada kolom kiri tabel kecil.
3. Diketahui nilai pantulan dinding 70%. Oleh karena itu bacalah pantulan rata-rata dengan cara menemukan perpotongan antara kolom 70 dan deret 0,56. Karena tidak tersedia deret untuk 0,56, maka perlu interpolasi. Ditemukan nilai pantulan rata-rata sekitar 55%.
4. Taruhlah harga 55% pada skala B (titik B') dan tariklah garis lurus ke titik A' di skala A yang ditemukan pada langkah 1 di atas.
5. Garis di atas akan memotong skala C di titik C', kira-kira, 1,2%. Itulah nilai IRC awal bila tidak ada penghalang di luar.
6. Karena ada penghalang maka kita perlu menghitung lebih lanjut. Buatlah titik T di tengah jendela. Pada titik T, buatlah garis horizontal dan garis bantu dari titik T ke ujung atas penghalang. Ternyata sudut penghalang 14°. Letakkanlah sudut tersebut di skala D (titik D').
7. Tariklah garis dari titik 14° (titik D') di skala D ke titik 1,2 di skala C (titik C'). Lanjutkan hingga memotong skala E di titik 0,95 (titik E'). Itu adalah IRC jika ada penghalang di luar.

Seperti jawaban pada soal 1, untuk lokasi dan kegiatan bersih MF = 0,9. Kemudian untuk pantulan rata-rata 55%, CF = 0,82. Dengan demikian IRC minimal = 0,95% x 0,9 x 0,82 = 0,7%.

DF = (SC + ERC + IRC)% = (0,99 + 0,277 + 0,7)% = 1,967%. Karena ada kaca (lihat jawaban soal 2), maka DF harus dikalikan dengan GF, FF, dan D atau nilai 0,9 ; 1,0 ; dan 0,9. DF akhir = 1,967% x 0,9 x 1,0 x 0,9 = **1,593%**. Kalau iluminasi di satu titik di luar ruang 10.000 lux, maka iluminasi di titik O adalah 1,593% x 10.000 lux = **159,3 lux**.

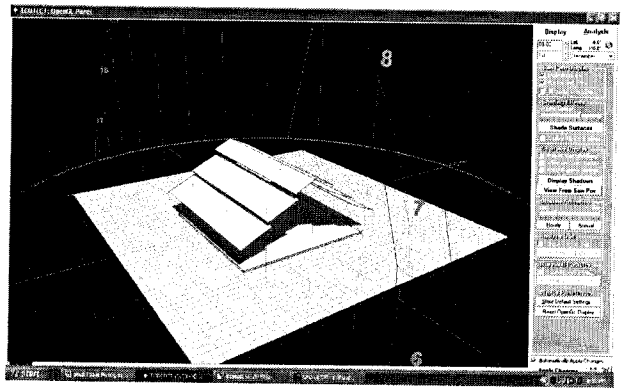


Gambar 3.24 *Nomogram*

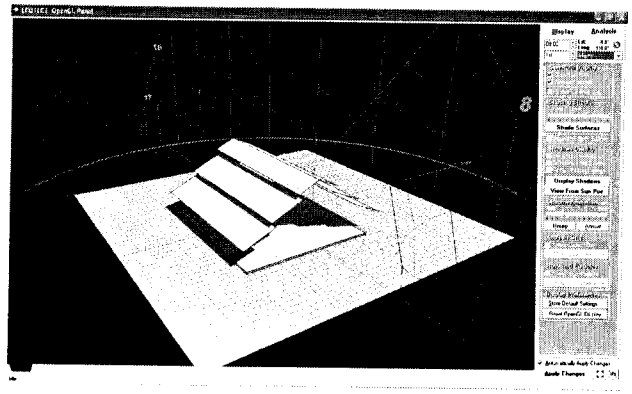
3.7 Galeri

Studi cahaya pada pasar di Yogyakarta diperlukan untuk:

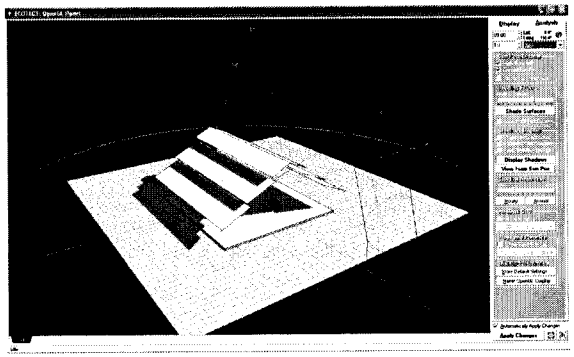
1. Menemukan konfigurasi bukaan yang optimal untuk keperluan pencahayaan di dalam pasar.
2. Memperoleh gambaran gangguan sinar-matahari-langsung yang akan menyebabkan panas dan kesilauan selama jam aktivitas.
3. Memperoleh gambaran distribusi intensitas cahaya alami agar area gelap dapat dihindari.



Pembayangan jam 09.00, 1 Desember.

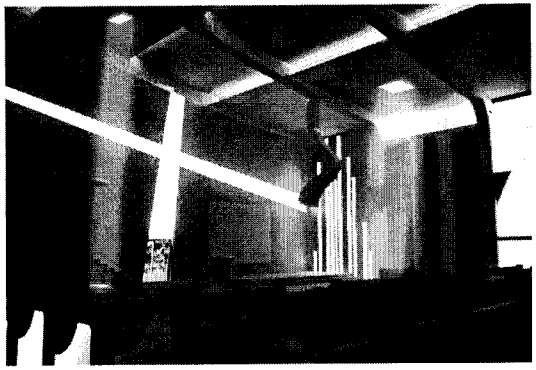


Pembayangan jam 09.00, 1 Maret.



Pembayangan jam 09.00, 1 Juli.

***Gambar 3.25** Simulasi pembayangan pada pasar (Satwiko, 2008)*

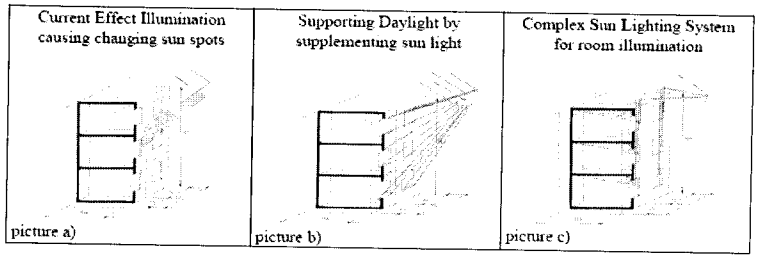


***Gambar 3.26** Simulasi cahaya siang pada gereja (Satwiko, 2007)*

'Sunpipe membantu penyaluran cahaya siang ke lokasi dalam ruangan yang jauh dari jendela, seperti pada ruang tidur ini.

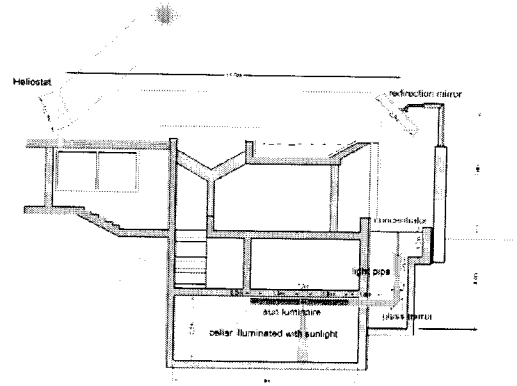
***Gambar 3.27** Sunpipe pada ruang tidur (http://www.sunpipe.com/24.htm)*

***Gambar 3.28** Pemasangan Ciralight pada atap* (http://www.soleraenergies.com/products_ciralight.aspx)



***Gambar 3.29** Beberapa cara konvensional untuk memantulkan cahaya dengan cermin ke dalam ruangan (Pohl)*

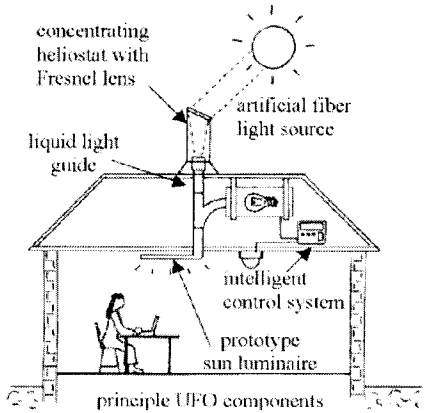
EXAMPLE 1: HELIOSTAT PROJECT:



Section Pilot Installation at Bartenbach LichtLabor GmbH, Aldrans, Austria

***Gambar 3.30** Heliostat Project (Pohl)*

Gambar 3.31 *Hasil dari heliostat project (Pohl)*



Gambar 3.32 *Pemakaian fibre optic untuk menyalurkan cahaya alami ke dalam ruangan (Pohl)*

3.8 Alamat Internet

http://www.alia.com.au/links/index.html; Australian Lighting Industry Association, menyediakan link ke banyak situs yang berhubungan dengan tata cahaya.
http://gaia.lbl.gov/iea21/ieacd.htm; Contoh-contoh menarik pencahayaan alami.

http://www.lib.berkeley.edu/ENVI/Daylighting.html; salah satu contoh yang bagus bibliografi di Internet mengenai topik cahaya siang dan lain-lain.

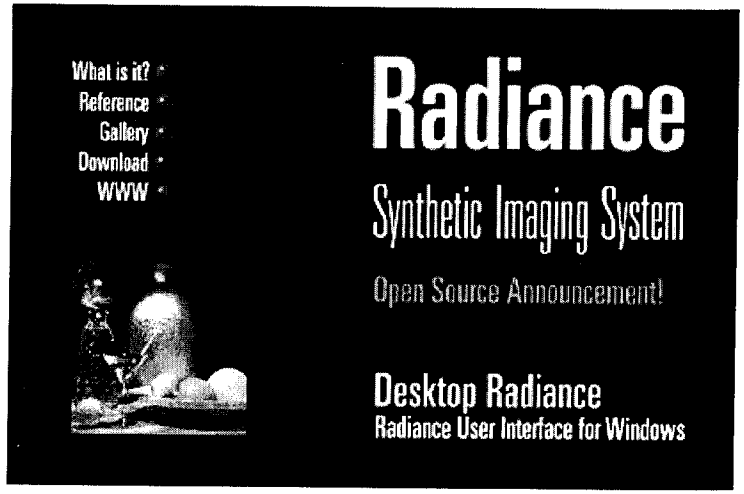
http://www.radiance.com; menyajikan contoh-contoh desain tata cahaya dengan program radiance. Program dapat di-*download* dengan gratis.

http://www.schorsch.com/; memberikan informasi tentang program Rayfront dan contoh-contoh hasil simulasi pencahayaan siang hari.

http://www.schorsch.com/kbase/glossary/; istilah-istilah dalam pencahayaan.

http://www.sunpipe.com; alat yang dapat membantu menyalurkan cahaya siang pada ruang-ruang di tengah bangunan.

3.9 Software



Gambar 3.33 *Radiance (http://radsite.lbl.gov/radiance/framed.html)*

BAB 4
PENCAHAYAAN BUATAN

Pencahayaan (atau penerangan) harus senantiasa dilihat dari sisi kualitas dan kuantitasnya. Makna pencahayaan buatan bukanlah sekadar menyediakan lampu dan terangnya, tetapi lebih-lebih adalah untuk membentuk suasana. Jadi pencahayaan bukan hanya masalah praktis, tetapi juga estetis. Dari titik pandang tersebut, memilih bentuk, jenis, warna lampu dan peletakannya dapat menjadi suatu pekerjaan yang mengandung unsur permainan yang sangat menyenangkan. Efek yang diberikan oleh lampu dapat melampaui apa yang kita harapkan. Dia tidak hanya memberikan terang untuk bekerja, tetapi juga membantu membentuk agar suasana kerja menjadi nyaman dan menyenangkan. Dengan demikian di saat merancang pencahayaan kita tidak harus kaku mengikuti standar kebutuhan cahaya untuk fungsi kerja tertentu, namun juga memikirkan agar suasana yang tercipta menyenangkan.

Pencahayaan buatan diperlukan karena kita tidak dapat sepenuhnya tergantung pada ketersediaan pencahayaan alami, misalnya pada malam hari atau di ruang yang tak terjangkau oleh cahaya alami. Dengan demikian sudah semestinya pencahayaan buatan bersifat saling mendukung dengan pencahayaan alami; tidak dapat dikatakan mana yang lebih unggul.

Pencahayaan buatan diperlukan bila:

- Tidak tersedia cahaya alami siang hari; saat antara matahari terbenam dan terbit.
- Tidak tersedia cukup cahaya alami dari matahari; saat mendung tebal, intensitas cahaya bola langit akan berkurang.
- Cahaya alami dari matahari tidak dapat menjangkau tempat tertentu di dalam ruangan yang jauh dari jendela.
- Diperlukan cahaya merata pada ruang lebar; Pada ruangan yang lebar, hanya lokasi di sekitar jendela saja yang terang, sedang bagian

tengah akan menjadi redup. Hal ini terutama terjadi pada ruangan lebar, luas dan terletak di bawah lantai lain sehingga tidak dapat dibuat lubang cahaya di atap. Namun jika toh ruang luas tersebut dapat diberi atap transparan, tidaklah terlalu disarankan untuk daerah tropis karena ruangan akan menjadi sangat panas.

- Diperlukan intensitas cahaya konstan. Ruang operasi, misalnya, memerlukan cahaya yang konstan pada intensitas tertentu. Cahaya alami akan tergantung oleh cuaca / awan yang tentu akan menyebabkan suatu saat terang dan redup dalam waktu berdekatan dan tak terkendali sehingga akan mengganggu jalannya operasi.
- Diperlukan pencahayaan dengan warna dan arah penyinaran yang mudah diatur; ruang pamer dan panggung pertunjukan adalah contoh tempat yang membutuhkan pencahayaan yang mudah diatur untuk menciptakan efek tertentu guna mendukung objek pameran atau pertunjukan.
- Cahaya buatan diperlukan untuk fungsi khusus; bayi manusia atau binatang yang baru lahir kadang memerlukan kehangatan. Lampu dapat menyediakan kehangatan.
- Diperlukan cahaya dengan efek khusus; misalnya pada pencahayaan dengan lampu ungu-ultra untuk memendarkan cat berlapisan fosfor.

Cahaya buatan memerlukan energi. Ini menjadi salah satu kekurangan pencahayaan buatan, terutama bila energi tersebut diperoleh dari sumber yang tak-terbarui seperti minyak bumi. Namun saat ini sudah mulai banyak energi yang diambil dari matahari dan angin, dan tentu saja air, sehingga kekurangan utama pencahayaan buatan dapat terus diperkecil.

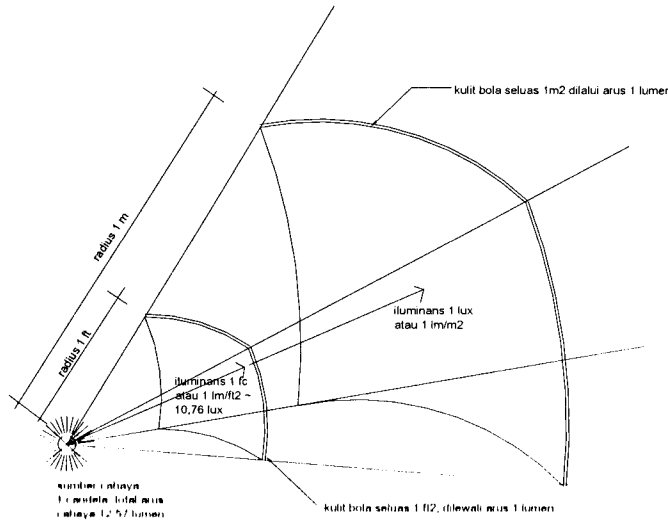
Sebagai tambahan, pencahayaan buatan tidak akan dapat sepenuhnya menggantikan pencahayaan alami dari matahari. Sinar matahari membawa efek fisik, kimia dan psikologis yang tidak seutuhnya dapat digantikan oleh sinar lampu. Makhluk hidup (manusia, hewan dan tumbuhan) pada dasarnya sangat terikat oleh alam. Oleh karena itu mengasingkan manusia secara total dari pencahayaan alami tentu tidak disarankan karena akan membawa dampak merugikan baik secara fisik maupun mental (depresi).

4.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Pencahayaan Buatan

Sub-bab ini menyarikan beberapa istilah yang sering ditemui dalam perancangan pencahayaan buatan. Sebagian telah dijelaskan pada Bab 3, namun beberapa pengertian akan diulang di sini sekadar untuk mengingatkan kembali. Bila ditemui istilah yang tidak tercantum, silahkan berselancar di Internet dan menengok alamat:

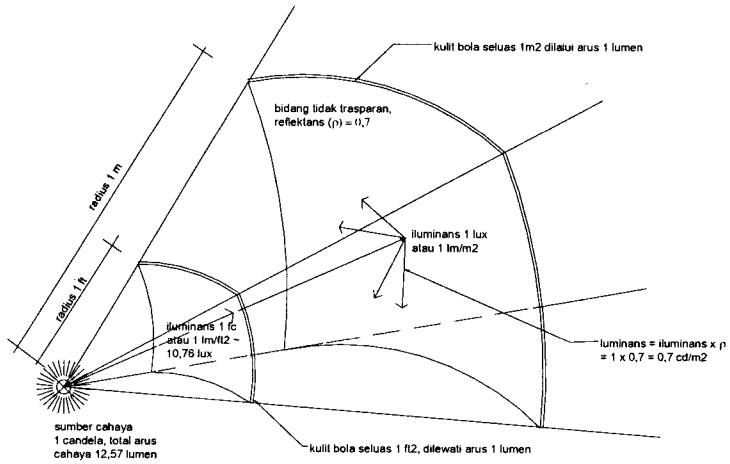
http://www.gelighting.com/na/institute/glossary.html

Intensitas cahaya (*Luminuos Intensity*) adalah kuat cahaya sumber cahaya dan diukur dengan candela pada sistem internasional (pada sistem Amerika disebut *candlepower*). Disepakati bahwa jika sebuah sumber cahaya yang mempunyai intesitas cahaya 1 candela diletakkan di titik pusat sebuah bola dengan jari-jari 1 m, maka **arus cahaya** yang datang pada 1 m^2 permukaan dalam kulit bola tersebut adalah 1 **lumen**. **Iluminasi** (cahaya yang datang pada suatu permukaan) pada kulit bola tersebut adalah 1 lumen per 1 meter persegi yang disebut sebagai **lux**. Karena luas kulit bola tadi adalah $4\Pi r^2$ (atau $4x3,14x1^2$) atau $12,57m^2$, maka sumber cahaya yang memiliki intensitas cahaya 1 candela memancarkan cahaya ke segala arah total sebanyak 12,57 lumen.

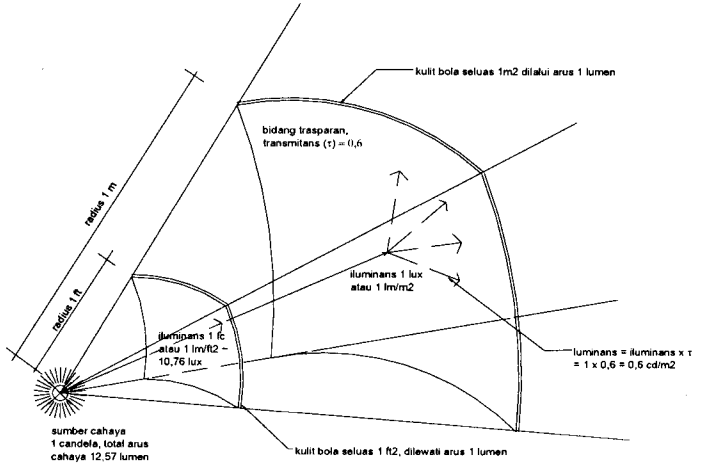


***Gambar 4.1** Definisi besaran cahaya*

Seandainya kulit bola tadi tidak transparan dan mempunyai bilangan pantul cahaya (reflektan, ρ) 0,7 maka luminan permukaan dalam bola tadi = iluminan x ρ = 1 x 0,7 cd/m^2. Lihat ***Gambar 4.2***. Kemungkinan lain, kulit bola tadi transparan. Seandainya kulit bola mempunyai bilangan transmitan (τ) = 0,6 maka luminan permukaan bola (dilihat dari luar bola) = iluminan x τ = 1 x 0,6 = 0,6 cd/m^2. Lihat ***Gambar 4.3***.



Gambar 4.2 *Luminan pada permukaan tak transparan*



Gambar 4.3 *Luminan pada permukaan transparan*

Cahaya buatan (*artificial light*) adalah segala bentuk cahaya yang bersumber dari alat yang diciptakan oleh manusia, seperti lampu pijar, lilin, lampu minyak tanah, dan obor. Cahaya buatan sering secara langsung diartikan atau diasosiasikan dengan cahaya lampu. Lawan dari cahaya buatan adalah cahaya alami (*natural light*), yaitu cahaya yang bersumber dari alam dan biasa langsung diasosikan dengan cahaya matahari (*daylight*).

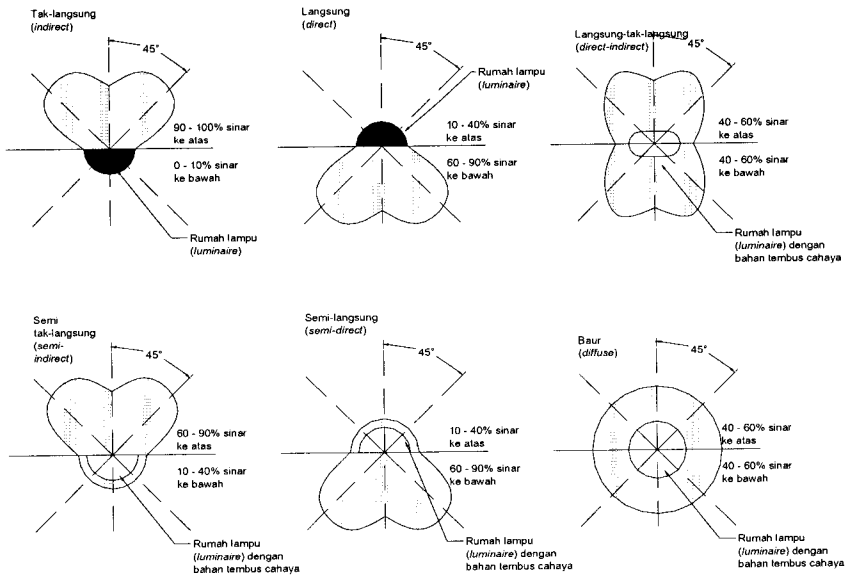
Kontras (*contrast*) adalah perbedaan antara luminan (kecerahan, *brightness*) benda yang kita lihat dan luminan permukaan di sekitarnya. Semakin besar kontras, semakin mudah kita melihat atau mengenali benda tadi. Bayangkanlah kalau buku ini dicetak pada kertas abu-abu tua, tentu lebih sulit dibaca bukan? Di ruang yang redup, kontras juga semakin berkurang. Dalam kaitannya dengan kontras tersebut, Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) memberikan saran reflektan permukaan untuk ruang sekolah dan kantor sebagai berikut:

Tabel 4.1 *Reflektan*

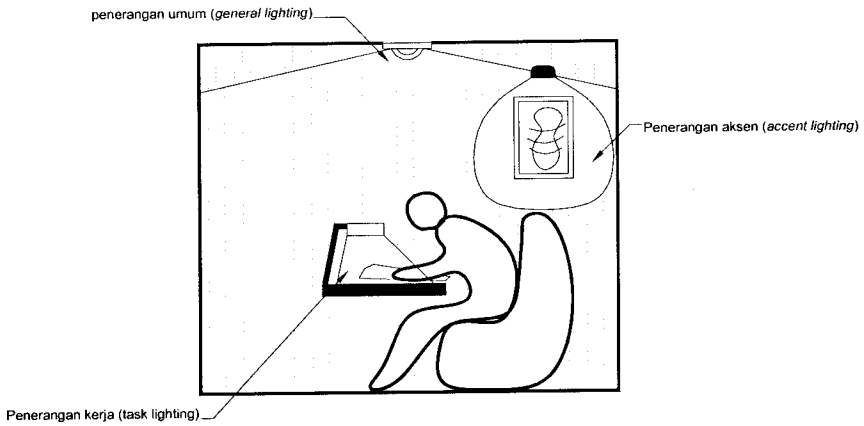
	Reflektan (%)	
	Kelas	Kantor
Langit-langit	70-90	>80
Dinding*	40-60	50-70
Partisi	--	40-70
Lantai	30-50	20-40
Perabotan dan mesin	--	25-45
Bangku dan meja	35-50	35-50

* Dinding yang berjendela harus mempunyai reflektan >80% untuk mengurangi kontras antara kaca yang cerah dengan sekitarnya.

Dari segi pengarahan cahaya dikenal istilah **pencahayaan langsung** (*direct lighting*), yaitu pencahayaan dengan mengarahkan sinar langsung ke bidang kerja atau objek. Lawan dari pencahayaan langsung adalah **pencahayaan tak langsung** (*indirect lighting*), yaitu pencahayaan dengan cara memantulkan sinar terlebih dahulu (misalnya ke langit-langit, dan ke dinding). Pencahayaan tak langsung sangat baur sehingga menimbulkan suasana lembut. Pada umumnya lampu memberikan gabungan antara kedua pencahayaan tersebut.



***Gambar 4.4** Arah cahaya*



***Gambar 4.5** Cakupan cahaya*

Berdasarkan cakupannya dikenal istilah **pencahayaan umum** (*general lighting*), yaitu pencahayaan merata untuk seluruh ruangan dan dimaksudkan untuk memberikan terang merata, walau mungkin minimal, agar tidak terlalu gelap. Berbeda dengan pencahayaan umum, **pencahayaan kerja** (*task*

lighting) adalah pencahayaan fungsional untuk kerja visual tertentu, biasanya disesuaikan dengan standar kebutuhan penerangan bagi suatu jenis kerja. Pencahayaan yang secara khusus diarahkan ke objek tertentu untuk memperkuat penampilannya (fungsi estetik) disebut **pencahayaan aksen** (*accent lighting*). **Cahaya ambien** (*ambient light*) adalah cahaya keseluruhan dalam suatu ruang yang merupakan efek gabungan dari pencahayaan umum, aksen, dll.

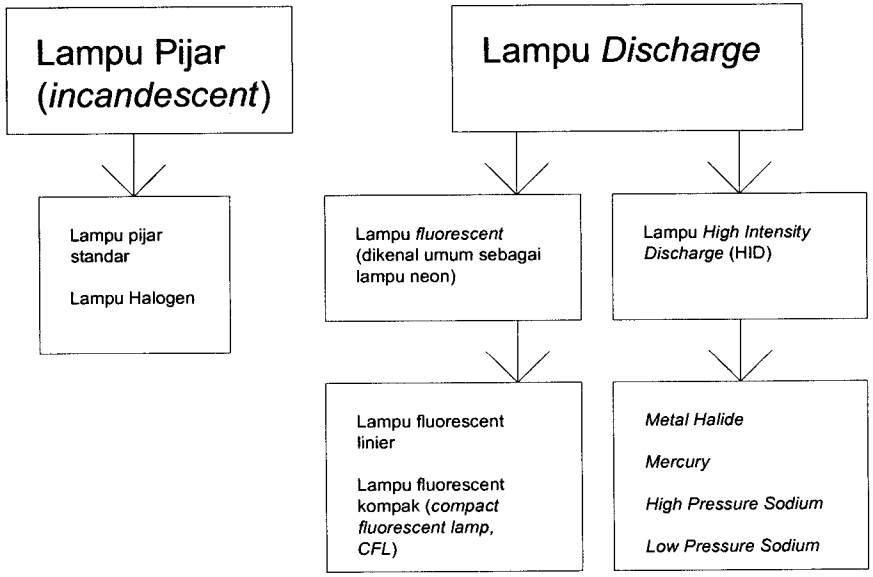
Jika kita menyebut *lampu*, umumnya kita membatasi atau menekankan pada bagian yang menyala. Dudukan lampu disebut **soket**, dan rumah lampu disebut **armatur**. Namun pada buku teks, keseluruhan bagian tadi sering disebut **luminer** (*luminaire*) dan biasanya terdiri atas bola lampu, soket, tudung, rumah lampu, tombol dan balas. Buku lain ada yang memisahkan luminer (soket, rumah, tudung, balas) dengan lampu dan memberikan sebutan bagi luminer dan lampu dengan istilah ***fixture***.

Setiap lampu dibuat dengan tujuan tertentu dan mempunyai arah yang disesuaikan dengan tujuannya. Beberapa istilah lampu sesuai dengan arah dan luas sinarnya adalah:

- **Penyinar atas** (*up-lighter*); lampu yang menyorot ke atas.
- **Penyinar bawah** (*down-lighter*); lampu yang menyorot ke bawah.
- **Penyorot sempit** (*spot light*); lampu dengan sudut sinar <30°.
- **Penyorot lebar** (*flood light*); lampu dengan sudut sinar >30°.
- **Penyiram dinding** (*wall-wash light*); lampu untuk menyiram bidang vertikal dengan cahaya.

Jenis lampu ada begitu banyak tersedia di toko. Namun pada umumnya dapat digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu ampu pijar (*incandescent*), lampu *fluorescent*, dan lampu HID (*High-Intensity Discharge*).

- **Lampu pijar** (*incandescent*); cahaya dihasilkan oleh filamen dari bahan tungsten (titik lebur >2200°C) yang berpijar karena panas. Maka disebut lampu tungsten. Efikasi lampu ini rendah, hanya 8-10% energi menjadi cahaya. Sisanya terbuang sebagai panas. Untuk memperbaiki efikasinya, lampu tungsten diisi gas halogen (antara lain iodine, chlorine, bromine dan fluorine) dan disebut lampu tungsten-halogen. Efikasinya mencapai 17,5 lm/watt.

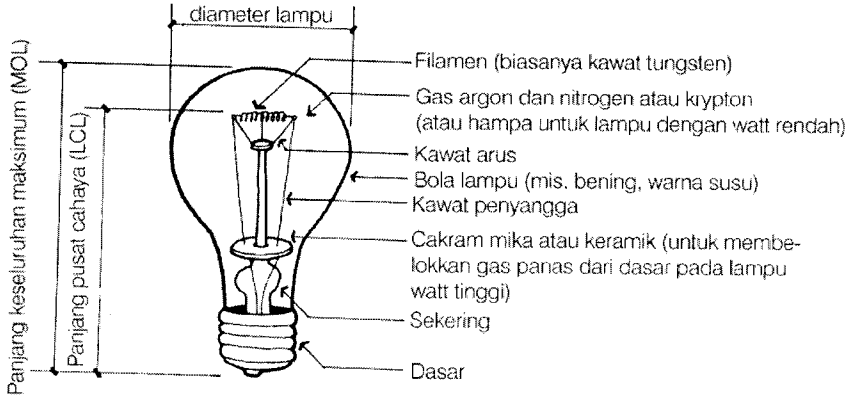


***Gambar 4.6** Pengelompokan jenis lampu*

- **Lampu fluorescent**; cahaya dihasilkan oleh pendaran bubuk fosfor yang melapisi bagian dalam tabung lampu. Fosfor tersebut berpendar karena menyerap gelombang pendek cahaya ungu-ultra sebagai akibat lecutan listrik (terbentuk oleh loncatan elektron antar-katode di dalam tabung yang berisi uap merkuri bertekanan rendah dan argon). Ramuan bubuk menentukan warna cahaya yang dihasilkan. Lebih dari 25% energi dijadikan cahaya. Efikasinya antara 40-85 lm/watt. Pada 100 jam pertama, terjadi penyusutan besar pada intensitas cahayanya (lumen). Efikasi (lumen per watt) lampu fluorescent 2-3 kali lebih baik dari lampu pijar.

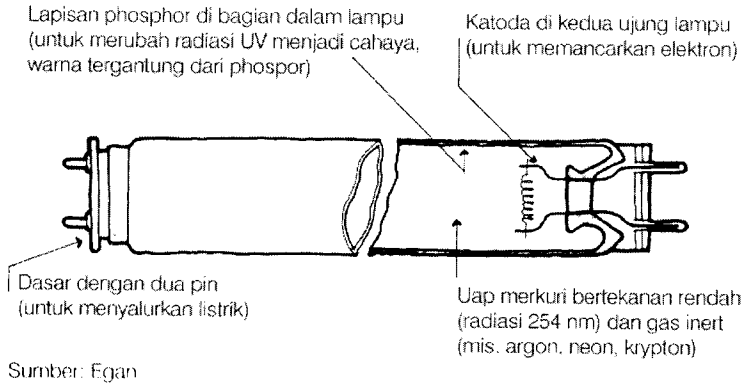
- **Lampu HID** (*High-Intensity Discharge lamps*); cahaya dihasilkan oleh lecutan listrik melalui uap zat logam. Lampu merkuri menghasilkan cahaya dari lecutan listrik dalam tabung kaca atau kuarsa berisi uap merkuri bertekanan tinggi. Efikasinya antara 40-60 lm/watt. Dibutuhkan waktu antara 3-8 menit (untuk menguapkan merkuri) sebelum menghasilkan cahaya maksimal. Perlu selang 5-10 menit sebelum dihidupkan kembali. Untuk memperbaiki efikasi dan warna, pada tabung lecutan listrik ditambahkan halida logam

(seperti thallium, indium dan sodium), maka disebut lampu metal-halida. Walau efikasi bisa mencapai 70 lm/watt, umumnya berkurang hingga separuh. Perkembangan selanjutnya dari lampu HID adalah lampu uap sodium bertekanan tinggi (*High pressure sodium vapor lamp*). Salah satunya adalah dengan membuat tabung lecutan dari keramik yang berisi xenon, merkuri dan sodium. Efikasinya mencapai lebih dari 95 lm/watt.



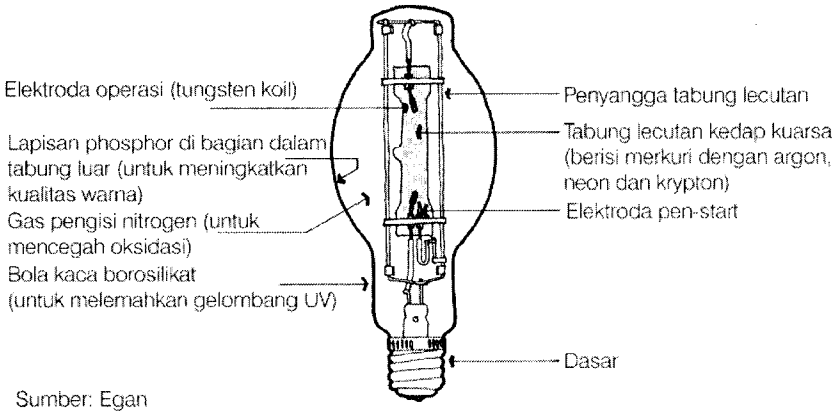
Sumber: Egan

***Gambar 4.7** Lampu pijar (incandescent lamp)*



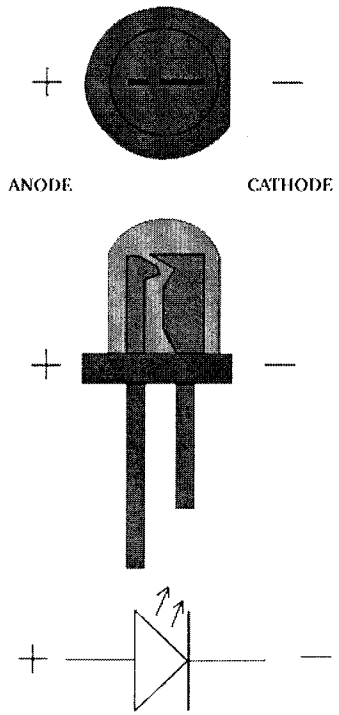
Sumber: Egan

***Gambar 4.8** Lampu fluorescent*

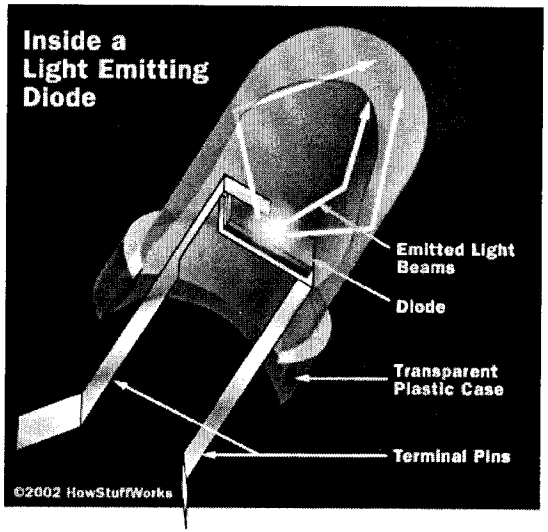


Sumber: Egan

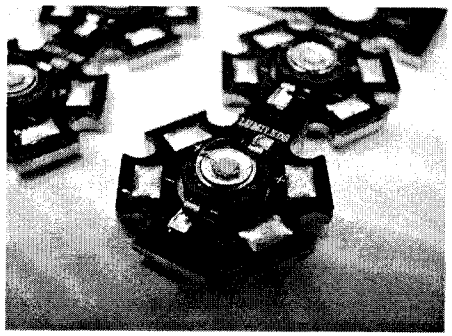
Gambar 4.9 *Lampu High Intensity Discharge (HID) – Merkuri*



Gambar 4.10 *Lampu LED (Light Emmiting Diode)- wikipedia*



Gambar 4.11 *Lampu LED (Light Emmiting Diode) - HowStuffWorks*



Gambar 4.12 *Lampu LED buatan Philips - wikipedia*

Cahaya hitam (*black light*) adalah istilah untuk cahaya ungu-ultra frekuensi tinggi (*high-frequency ultra violet light*). Dinamakan demikian karena sumber cahaya tersebut tidak terlihat (*invisible*) namun akan menyebabkan benda berpendar bila terkena olehnya. Zat yang berpendar bila terkena UV dinamakan *fluorescene*. Mekanismenya, cahaya ungu-ultra (yang tidak terlihat, *invisible light*) akan diserap oleh fluorescene dan dilepaskan sebagai cahaya terlihat (*visible light*). Istilah yang agak berbau *plesetan* tersebut juga memperoleh kekuatan kesannya karena sering dipakai pada acara-acara halowen (untuk menakut-nakuti anak-anak!)

4.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar

Pada bagian ini akan dibahas pengetahuan dasar untuk pencahayaan buatan, seperti sejarah, karakter lampu sesuai warna sinarnya, lampu pijar (*incandescent*), lampu fluorescent, dan lain-lain.

4.2.1 Sedikit tentang Sejarah Lampu

- 1809, seorang kimiawan Inggris, Humphry Davy, membuat baterai dengan 2000 sel dan menyalakan dua utas arang.
- 1879, seorang Amerika, Thomas Alfa Edison, menciptakan lampu dengan filamen arang dalam tabung vakum.
- 1880, seorang pejabat militer Inggris, Lord Armstrong, mengadakan pesta dengan pencahayaan lampu pertama di dunia.
- 1907, filamen arang diganti filamen tungsten.
- 1938, lampu fluorescent ditemukan.

Cahaya matahari mengatur tingkat hormon melanonin yang mempunyai efek kuat pada tidur, suasana hati dan siklus reproduksi. Kekurangan cahaya matahari akan menyebabkan hormon melanonin menumpuk yang berakibat depresi dan lesu. Kasus penderita buta warna total (melihat TV warna seperti TV hitam putih) pada pria lebih besar daripada wanita, 0,003% berbanding 0,002%.

4.2.2 Karakter Lampu Sesuai dengan Warna Sinarnya

- Lampu pijar (*incandescent*): *warm-white* (putih-hangat), mengeluarkan warna hangat antara merah dan kuning;
- Fluorescent, uap merkuri, metal-halida: *cool-white* (putih-dingin), mengeluarkan warna dingin antara hijau dan biru;
- Sodium bertekanan tinggi (*high-pressure sodium*): *golden-white* (putih-keemasan), mengeluarkan warna cemerlang antara kuning dan jingga;
- Sodium bertekanan rendah (*low-pressure sodium*): monokhromatik, mengeluarkan warna tunggal jingga.

Usahakanlah sedapat-dapatnya memakai lampu yang mempunyai spektrum lengkap seperti matahari.

Lampu ungu dapat membersihkan ruang dari beberapa macam kuman penyakit. Nyalakanlah selama 1-2 jam. Sementara itu ruangan jangan ditempati. (Beberapa ahli supranatural meyakini lampu ungu dapat mengurangi energi buruk!)

4.2.3 Lampu Pijar (*Incandescent*)

- Memasang lampu pijar secara menggantung (bagian dasar lampu terletak di atas) akan memperpanjang efikasi, karena proses penghitaman (residu penguapan filamen) akan tersamar di bagian dasar lampu;
- Memasang lampu pijar menempel di langit-langit tanpa menggunakan tudung akan menyebabkan lingkaran hitam di langit-langit. Lingkaran hitam tersebut sebenarnya adalah kotoran udara yang terbawa oleh arus panas dari lampu yang mengalir ke atas dan menempel di langit-langit. Debu-debu ini lama-kelamaan akan menumpuk di langit-langit dan membentuk lingkar kotoran. Pada lampu fluorescent, kotoran berbentuk memanjang.
- Lampu pijar dengan watt besar lebih efisien dari yang berwatt rendah. Sebagai contoh, sebuah lampu 100 W (120 V) menghasilkan 1750 lumen. Sedang dua lampu 50 W (120 V) hanya akan menghasilkan 1280 lumen.

Keuntungan memakai lampu pijar:

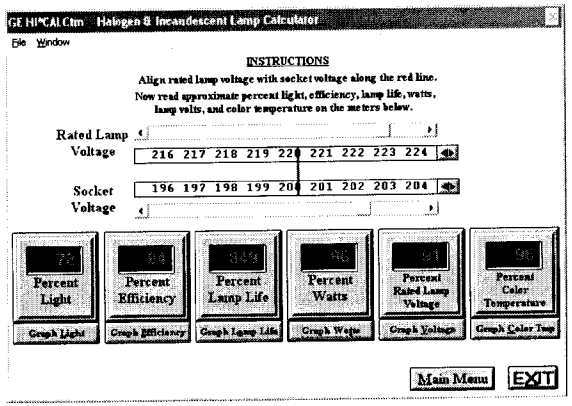
- Ukuran filamen kecil maka sumber cahaya dapat dianggap sebagai titik sehingga pengaturan distribusi cahaya lebih mudah;
- Perlengkapan sangat sederhana dan dapat ditangani dengan sederhana;
- Pemakaian sangat luwes;
- Biaya awal rendah;
- Pengaturan intensitas cahaya (redup dan terang) mudah dan murah (dengan memakai *dimmer*);
- Tidak terpengaruh oleh suhu dan kelembaban;
- Menampilkan warna-warna dengan sangat bagus.

Kerugian memakai lampu pijar:

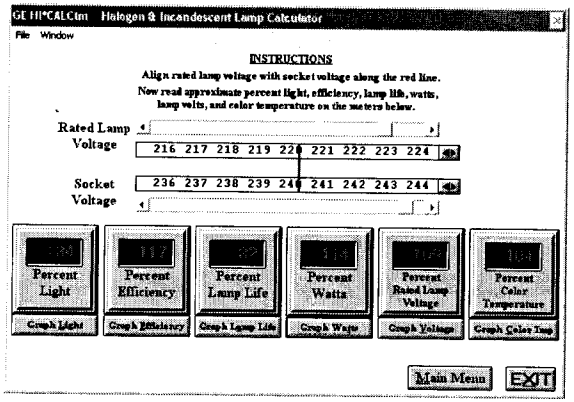
- Lumen per watt (efikasi) rendah;
- Umur pendek (750-1000 jam), makin rendah watt makin pendek umurnya;
- Untuk negara tropis, panas dari lampu akan menambah beban AC;
- Warna yang cenderung hangat (kemerahan), secara psikologis akan membuat suasana ruangan kurang sejuk;
- Hanya cocok untuk kebutuhan pencahayaan rendah;
- Menyalakan sebuah lampu pijar pada tegangan lampu yang tidak sesuai dengan tegangan yang disarankan akan menyebabkan keuntungan dan kerugian. Menyalakan lampu pijar 120 Volt pada tegangan 125 Volt (104.2%) dan 115 Volt (95.8%) akan menyebab-kan kinerja lampu (kira-kira) sebagai berikut:

Tabel 4.2 *Hubungan antara tegangan listrik dengan kinerja lampu*

	Pada tegangan **125** Volt	pada tegangan **115** Volt
Arus cahaya (lumen)	>16%	<15%
kebutuhan daya (watt)	>7%	<7%
efikasi (lumen/watt)	>8%	<8%
umur (jam)	<42%	>72%



Gambar 4.13 *Program GE_Hi*Calc yang menunjukkan efek pemakaian voltase yang lebih rendah dari desain pabrik*



Gambar 4.14 *Program GE_Hi*Calc yang menunjukkan efek pemakaian voltase yang lebih tinggi dari desain pabrik*

4.2.4 Lampu Fluorescent

Keuntungan:

- Efikasi (lumen per watt) tinggi;
- Awet (umur panjang), hingga 20.000 jam (dengan asumsi lama penyalaan 3 jam setiap penyalaan). Makin sering dihidup-matikan, umur semakin pendek;
- Bentuk lampu yang memanjang menerangi area yang lebih luas dengan cahaya baur;
- Untuk penerangan yang tidak menghendaki bayangan, lampu fluorescent lebih baik dibanding lampu pijar;
- Warna cahaya yang cenderung putih-dingin menguntungkan untuk daerah tropis lembab, karena secara psikologis akan menyejukkan ruangan.

Kerugian:

- Output cahaya terpengaruh oleh suhu dan kelembaban;
- Tidak mudah mengatur intensitas cahayanya dengan menggunakan *dimmer*;
- Warna keputihan cenderung tidak alami, terutama untuk warna kulit;

- Kecerobohan pemasangan balas sering menimbulkan bunyi dengung yang mengganggu dan melelahkan;
- Balas akan mengeluarkan cukup banyak panas yang membebani mesin pengondisi udara (*air conditioner*);
- Menimbulkan efek cahaya yang bergetar pada arus bolak-balik (ac), sedang pada lampu fluorescent arus searah (dc), efek ini tidak tampak;
- Semakin banyak jumlah lampu dalam satu luminer, efisiensi semakin rendah karena cahaya yang terhalang, terperangkap, serta panas yang timbul. Sebuah lampu fluorescent yang terbuka memiliki efisiensi 95%, sedang empat lampu fluorescent yang dijejalkan pada satu luminer hanya akan mempunyai efisiensi 64%;
- Efisiensi lampu akan meningkat bila suhu dipertahankan tidak lebih dari 40°C. Oleh karena itu luminer harus berventilasi. Untuk pemakaian di bangunan berpengondisi udara sentral, amat baik bila diusahakan luminer terpadu dengan sistem aliran udara dingin.

Lampu neon adalah sebutan salah kaprah di Indonesia bagi Fluorescent Lamp (FL). Lampu neon sebenarnya adalah sebutan bagi lampu pembentuk huruf nama toko, iklan, dll.

4.2.5 Lampu HID (*High-Intensity Discharge*)

Keuntungan:

- Kecuali lampu merkuri (yang kualitas cahayanya lebih baik dari lampu pijar), efikasi lampu HID jauh lebih tinggi dibanding lampu pijar dan fluorescent;
- Lebih awet dari lampu pijar, dan kadang-kadang lebih awet dari fluorescent;
- Pendistribusian cahaya lebih mudah daripada lampu fluorescent;
- Biaya operasional sangat rendah;
- Tidak seperti lampu fluorescent, lampu HID tidak terpengaruh oleh variasi suhu dan kelembaban lingkungan.

Kerugian:

- Biaya awal sangat tinggi;
- Harga lampu lebih mahal dari jenis lain, hingga dapat memengaruhi biaya penggantian lampu;
- Seperti halnya dengan lampu fluorescent, lampu HID butuh balas yang dapat mengeluarkan suara mengganggu;
- Lampu membutuhkan waktu sekitar 8 menit untuk bersinar secara penuh;
- Beberapa lampu dapat mengeluarkan cahaya ungu-ultra yang membahayakan kesehatan;
- Lampu HID hanya cocok untuk ruangan dengan ketinggian langit-langit sedang (3-5m) sampai tinggi (>5m); awalnya lampu ini dirancang untuk pemakaian di luar ruangan, tetapi produk baru yang dilengkapi dengan pengoreksi warna cocok juga untuk penggunaan di dalam ruangan.

4.2.6 Lampu LED (*Light Emmiting Diode*)

Keuntungan:

Mempunyai efisiensi lumen per watt tinggi;

- Mempunyai warna yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanpa menambah filter sehingga menghemat biaya;
- Ukurannya kecil, >2mm^2, sehingga dapat digabung-gabungkan tanpa memerlukan banyak ruang;
- Dapat dihidup-matikan dengan cepat;
- Dapat dihidup-matikan tanpa mengurangi umur;
- Mudah dipasangi *dimmer*;
- Mati pelahan-lahan, tidak mendadak;
- Berumur panjang, 35.000 – 50.000 jam;
- Tahan goncangan;
- Dapat difokuskan dengan mudah tanpa tambahan alat;
- Tidak mengandung merkuri.

Kerugian:

- Saat ini harganya masih relatif mahal;
- Terpengaruh oleh suhu ;
- Peka terhadap tegangan listrik;
- Kualitas warna sering menyebabkan warna objek tidak alami karena spektrum cahaya LED berbeda dengan lampu pijar dan matahari;
- *Blue hazard*, lampu LED biru dan putih diduga memancarkan cahaya di atas persyaratan sehingga dapat mengganggu kesehatan mata;
- *Blue pollution*, lampu LED putih memancarkan gelombang warna biru yang sangat kuat sehingga dapat mengganggu lingkungan.

***Tabel 4.3** Perbandingan efikasi (efisiensi lampu)*

Sumber	Efikasi (lm/watt)
Lilin	0,1
Lampu minyak	0,3
Lampu Edison yang pertama	1,4
Lampu Edison tahun 1910	4,5
Lapu pijar modern	14 -18
Lampu halogen tungsten	16 - 20
Lampu fluorescent	50 - 85
Lampu mercury	40 - 70
Lampu halide-metal	60 - 80
Lampu sodium bertekanan tinggi	90 -100
Light emiting diode (LED)	115 - 180

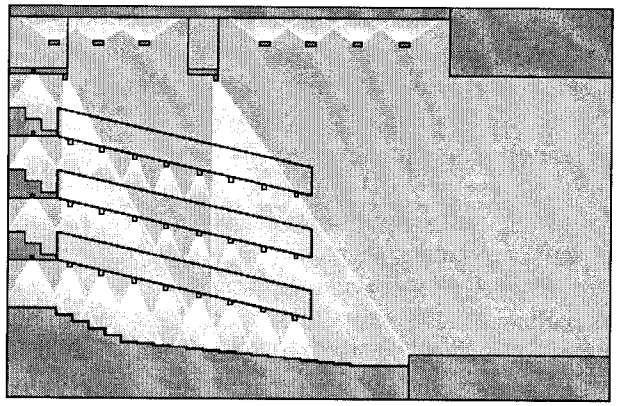
Catatan: Dengan kemajuan teknologi yang cepat, angka-angka di atas dapat terlalu kecil.

4.3 Aspek Perancangan

Beberapa pertanyaan untuk mempersiapkan diri:

- Kegiatan apa yang akan diterangi? Berapa intensitas cahaya yang diperlukan?
- Suasana apa yang dikehendaki? Santai, intim, atau formal?
- Apakah ada sumber pencahayaan buatan lain?
- Apakah pencahayaan alami terlibat?
- Apakah diinginkan penghematan energi?

Menurut perjalanan sinar, secara garis besar pencahayaan dapat dibagi menjadi dua: pencahayaan langsung dan tak langsung.



***Gambar 4.15** Contoh sketsa tata cahaya auditorium (Ganslandt, 1992)*

4.3.1 Teknik Pencahayaan Langsung

Teknik pencahayaan langsung paling umum kita temui. Ini mudah dipahami karena naluri kita pada saat memasang lampu adalah mengarahkan cahaya ke titik yang membutuhkannya (gelap). Jadi cahaya lampu langsung ke objek yang perlu diterangi sehingga menjadi efisien.

Pencahayaan langsung dari lampu titik (misalnya lampu pijar) akan memberikan bayangan kuat dan tegas. Ini sangat bagus untuk tujuan dekoratif. Pada pencahayaan langsung ini perlu diperhatikan kesilauan yang biasanya terjadi akibat mata yang menatap langsung sumber cahaya. Di samping itu jarak antara lampu dengan objek perlu juga diperhatikan agar panas tidak mengganggu objek yang disinari.

Pencahayaan langsung ke dinding

Selain langsung ke bidang kerja, pencahayaan langsung ke dinding banyak dilakukan. Mohon tidak rancu, karena pencahayaan langsung ke dinding ini dapat menjadi pencahayaan tak langsung bagi bidang kerja atau meja, yaitu ketika cahaya pantulan dari dinding jatuh ke meja tadi. Pencahayaan langsung ke dinding (bidang vertikal) dimanfaatkan agar ruang berkesan luas dan dramatis; baik untuk menerangi lukisan di dinding, atau sekadar memamerkan bahan dinding.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada pencahayaan langsung ke dinding:

- **Bila ingin menciptakan penerangan lembut pada dinding,** letakkan lampu pada jarak agak jauh dari dinding untuk menghindari timbulnya efek lingkaran cahaya terang (*hot spot*). Untuk itu hindari pemakaian lampu yang membentuk lingkaran cahaya jelas (*scalopping*). Jarak lampu ke dinding (D) = 1,5 SC x jarak lampu ke lantai (H). S antara 0,5 D hingga 1,0 D, tergantung dari kelembutan cahaya yang diinginkan serta intensitas cahaya lampu. Semakin rapat semakin lembut. Jangan menyorot dinding mengilap karena cahaya lampu akan memantul. Pilihlah bahan dinding yang memantulkan cahaya, tetapi tidak mengilap. Jangan menyorot pintu atau jendela, kecuali Anda yakin bahwa lampu tidak menyilaukan orang yang keluar masuk pintu atau berada di balik jendela.
- **Bila ingin menerangi dinding bertekstur**; Dinding bertekstur seperti batu bata ekpos, batu telor, dll. akan tampil lebih manis dengan lampu yang diletakkan sejauh 0,25–0,30m dari dinding. Jarak yang terlalu dekat akan menyebabkan ceruk-ceruk berkesan terlalu dalam, sedang biila terlalu jauh akan menyebabkan efek datar. Untuk langit-langit tinggi, gunakan lampu tipe R atau PAR dengan sebaran cahaya sempit, sedang untuk langit-langit rendah (hingga sedang), gunakanlah yang sebaran cahayanya lebar. Jarak antarlampu (S) < 4m.
- **Menciptakan efek kulit kerang (*scalopping*)**; Penerangan ini digunakan untuk mengurangi efek dinding datar yang membosankan. Gunakan lampu dengan sebaran cahaya kerucut. Jarak dengan dinding (D) antara 0,30-0,40m. Sedang jarak antarlampu (S) disesuaikan dengan efek yang diinginkan, biasanya sekitar 1,2m. Usahakan efek kulit kerang membentuk lengkungan yang teratur, karena bila tidak maka akan menyebabkan kisruh.
- **Penerangan untuk lukisan atau objek di dinding**; perbandingan antara penerangan objek dengan dinding tidak lebih dari 5:1, tapi juga jangan kurang dari 3:1. Biasanya digunakan perpaduan antara penerangan dinding dengan penerangan aksen. Bila cahaya di ruangan sudah mencukupi, maka hanya perlu digunakan cahaya aksentuasi saja. Lampu untuk aksen perlu disembunyikan agar tidak terlihat oleh mata dalam posisi berdiri normal. Bila lukisan mengkilap, lampu harus diatur agar pantulan cahaya lampu tidak mengarah ke mata. Posisikan lampu sesuai garis tengah lukisan. Jarak lampu ke dinding (D) = 0,5 x (tinggi lampu–tinggi mata rata-rata dalam keadaan berdiri). Perhatikan ketebalan pigura agar tidak menimbulkan bayangan yang mengganggu pada lukisan.

Pencahayaan langsung ke langit-langit berornamen:

- Usahakan sumber cahaya tidak terlihat, hanya pendar cahaya ornamen saja yang terlihat;
- Terlalu sedikit lampu akan membuat bayangan terlalu kuat. Sebaliknya, terlalu banyak lampu akan menghilangkan detail;
- Kombinasi antara lampu fluorescent untuk ornamen memanjang, dan neon atau katoda dingin untuk ornamen lengkung. Pisahkan balas bila dengungnya mengganggu;
- Lampu pijar dalam jumlah banyak dapat digunakan untuk efek kerlipan pada ornamen mengilap. Lampu robyong (*chandelier*) menggunakan lampu pijar kecil tetapi banyak.

4.3.2 Teknik Pencahayaan Tak Langsung

Pencahayaan tak langsung memberikan cahaya lembut merata yang tak menimbulkan bayangan di bidang vertikal maupun horizontal. Karena titik sumber cahaya tidak mencolok maka pantulan yang menyilaukan pada buku, monitor komputer dan TV dapat diperkecil. Namun keseragaman cahaya sering menyebabkan ruangan berkesan monoton (membosankan), apalagi jika warna ruangan putih. Bila sumber cahaya terlalu dekat dengan langit-langit maka dapat menciptakan pola-pola cahaya di langit-langit yang tidak menarik yang mungkin akan bertentangan dengan pola langit-langit. Rumah lampu biasanya akan menimbun debu dan kotoran lain.

Beberapa petunjuk praktis untuk pencahayaan tak langsung:

- Warna, detail ruang dan perabot harus terdukung oleh sumber cahaya yang dipilih;
- Untuk lampu hingga 400 W, jarak lampu dengan langit-langit antara 0,6-0,9m;
- Jarak luminer dari dinding antara 0,12-0,15m;
- Permukaan langit-langit jangan dari bahan yang mengilap;

- Untuk menjaga kesamaan warna maka penggantian lampu harus secara bersamaan (sesuai kelompoknya) dan harus dihindari pemakaian lampu dengan watt yang berbeda-beda;
- Untuk menjaga efisiensi *output*, lampu perlu dibersihkan secara berkala.

4.3.3 Teknik Penerangan Aksen

Teknik penerangan ini digunakan untuk memberikan efek khusus pada objek sehingga karakter objek yang diinginkan dapat ditonjolkan.

- **Pencahayaan baur**; untuk memberi penerangan lembut merata pada objek dan daerah sekitarnya. Penerangan ini akan mengurangi detail dan kesan tiga dimensional objek karena ketiadaan bayangan. Biasanya dipakai penyorot lebar (*floodlight*).
- **Pencahayaan sorot**; untuk menarik pandangan ke arah objek tanpa menyebabkan objek terlepas dari lingkungan sekitarnya. Perbandingan intensitas cahaya objek dengan sekitarnya antara 2:1 hingga 6:1. Kurang dari itu, efek penonjolan objek akan hilang. Sebaliknya lebih dari itu objek akan terlalu cerah hingga detailnya hilang. Biasanya dipakai penyorot sempit (*spotlight*).
- **Pencahayaan latar belakang**; untuk menekankan material di latar belakang objek dan menonjolkan siluet objek (warna serta materialnya tidak akan jelas). Biasanya dipakai penyorot lebar (*floodlight*) yang mengarah langsung ke dinding latar belakang (dengan lampu biasa tipe A atau R).

4.3.4 Teknik Pembayangan

Teknik pembayangan digunakan untuk mengeksplorasi kesan tiga dimensional objek. Teknik ini biasa digunakan di pameran-pameran, di mana cahaya digunakan untuk memaksimalkan karakter objek yang hendak dicapai. Pada umumnya dipakai lebih dari satu lampu dengan intensitas berbeda-beda, yang diletakkan tidak terlalu jauh dari objek. Pemakaian satu lampu saja akan menimbulkan kontras yang terlalu kuat. Dengan memakai beberapa lampu maka akan dapat saling mengisi. Letak lampu cukup penting. Untuk patung wajah orang, misalnya, letak 45° di atas cukup baik. Terlalu ke atas maupun ke bawah akan menimbulkan efek teatrikal yang dramatis, kurang alami.

4.3.5 Kualitas Permukaan Ruang

Dalam perancangan pencahayaan, kualitas permukaan (tekstur, pola, warna) harus sangat diperhatikan. Kondisi permukaan tersebut tidak dapat dipisahkan dari cahaya karena mereka membentuk suasana ruang. Beberapa hal yang perlu diperhatikan:

- Refleksi cahaya permukaan ruang akan berpengaruh langsung pada tingkat gelap terang ruang tersebut; ruang yang membutuhkan tingkat cahaya tinggi, sebaiknya menggunakan warna-warna dengan bilangan pantul tinggi, yaitu warna-warna muda. Memakai lampu dengan intensitas cahaya tinggi di ruangan yang dindingnya berefleksi rendah (warna-warna gelap) akan membuat suasana menjadi tidak nyaman karena perbedaan kecerlangan antara lampu dengan dinding terlalu tajam.
- Ruangan dengan dinding berpola (corak) besar dan kontras akan terasa sempit, sebaliknya dinding berpola-pola kecil dengan kontras lembut akan terasa lebar.
- Ruangan dengan warna-warna kontras dapat membangkitkan gairah dan semangat tetapi juga dapat menyakitkan hingga menyebabkan waktu terasa berjalan lambat. Warna-warna ini efektif digunakan untuk tempat yang dimaksudkan untuk dipergunakan pelanggan dalam waktu singkat, misalnya di kedai makanan siap saji (*fast food*), koridor dan tempat basuh tangan. Sebaliknya warna berkontras rendah (lembut) akan membuat waktu terasa pendek.
- Warna hangat bersemangat baik digunakan di ruang yang membutuhkan gairah, misalnya ruang-ruang yang tidak dimasuki sinar matahari, bersuhu dingin, bertekstur lembut dan sunyi. Sebaliknya ruang-ruang yang terkena sinar-matahari-langsung, bising, dan bertekstur kasar, sebaiknya memakai warna-warna dingin dan lembut.
- Bila ruangan akan memakai warna dengan kontras rendah, pakailah satu warna saja dengan gradasi lembut.
- Bila akan memakai warna-warna kontras, pilihlah yang saling mendukung. Bila tiga warna akan dipakai, sebaiknya dua di antaranya berhubungan dekat, sedang warna ketiga mendukung perpaduan kedua warna tersebut.

- Nada warna sangat perlu diperhatikan. Ada banyak macam warna merah, biru, dsb. Nada warna cerah sangat cocok bagi toko kelontong untuk menarik pengunjung agar singgah sejenak, yaitu di bagian *display*-nya. Sedang di bagian dalam diterapkan nada warna lunak agar pengunjung betah.
- Warna memengaruhi kesan ukuran dan jarak objek. Warna cerah membuat objek berkesan lebih besar, sebaliknya warna gelap membuat objek tampak agak kecil. Warna hangat membuat objek tampak lebih dekat daripada warna biru.
- Ruang yang berhubungan dengan kegiatan pengamatan corak kulit manusia (salon kecantikan, ruang hias), sebaiknya memakai lampu hangat yang kaya akan warna merah seperti lampu pijar atau fluorescent putih-hangat (*deluxe warm white fluorescent*) dengan intensitas cahaya rendah. Sedang untuk perkantoran, karena corak kulit tidak begitu penting, pilihlah lampu *cool white*, *deluxe cool white*, *white mercury* atau *metal halide*.
- Bila penampilan warna objek penting, sebaiknya pilih lampu yang memiliki spektrum lengkap. Apabila warna benda tidak terdapat pada spektrum cahaya maka warna benda akan berubah, bahkan dapat berwarna hitam saja. Memilih warna lampu yang sesuai dengan warna benda akan sangat efektif, tetapi penggunaan secara berlebihan dapat menimbulkan kecurigaan. Ini dapat terjadi pada konsumen toko yang kritis, yang mungkin berpikir bahwa lampu menipu penampilan objek.

4.3.6 Memberi Kesan pada Lingkungan

Cahaya dapat dipergunakan untuk menciptakan kesan tertentu pada lingkungan. Beberapa cara sederhana adalah sebagai berikut:

- Kesan luas ruangan dapat dicapai dengan membuat intensitas penerangan dinding lebih tinggi dari pencahayaan umum ruangan. Warna dingin dinding akan menambah kesan lebar. Di samping itu kaca akan menambah kesan luas ruangan. Lampu diarahkan ke dinding, bukan ke kaca. Jendela dengan pemandangan keluar juga akan memberi kesan lebar.
- Kesan *jelas* dapat dicapai dengan cahaya putih merata berintensitas tinggi. Sumber cahaya terlihat (misalnya digantung di langit-langit), dinding berwarna terang dan tidak berpola. Namun pencahayan seperti ini mudah menimbulkan rasa bosan.

- Kesan santai dapat dicapai dengan menghindari kesilauan. Lampu meja, lampu aksen, atau lampu penyiram dinding dapat dipakai. *Dimmer* dapat dipakai agar tingkat cahaya dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Sumber cahaya disembunyikan, redup, warna lembut, dinding tidak terlalu terang, dan langit-langit agak gelap.
- Kesan ruang pribadi (*private space*) dapat dicapai dengan meredupkan cahaya umum di ruang bersangkutan seraya menambah terang di lokasi tertentu (tempat kegiatan utama akan dilakukan). Dalam hal ini warna-warna hangat biasanya disukai (lampu pijar atau lilin).
- Kesan menyenangkan pada ruang kantor dapat dicapai dengan mengurangi kesan terlalu formal (kaku), monoton dan membosankan. Salah satunya adalah dengan memakai pencahayaan yang beragam (bervariasi, tidak seragam). Permainan cahaya di dinding berlukisan (atau bertekstur), gelap terang antara meja kerja dan area sekitarnya adalah salah satu caranya. (Kesan membosankan dan monoton dapat terjadi jika tugas visual tidak menarik, ditambah dengan penerangan seragam di semua area ruang, serta warna-warna lesu.)
- Kesan tertekan dapat timbul di ruang yang terlalu redup, berwarna gelap seperti coklat tua dan hitam.
- Kesan menggairahkan dicapai dengan penerangan yang berubah-ubah, bahkan berkelap-kelip, dengan warna bergairah.
- Kesan membingungkan dapat terjadi bila penerangan tidak seragam, konflik dengan permukaan yang berpola riuh rendah.
- Kesan efek gua yang menakutkan dapat terjadi bila kontras antara penerangan meja dengan ruang gelap di sekitarnya terlalu tinggi. Bayang-bayang perabot akan menampilkan sosok-sosok menakutkan di dinding.
- Kesan lorong gelap terjadi bila ruang dalam terang dan ruang luar gelap. Lampu akan terpantul pada kaca yang gelap. Dapat dihindari dengan memasang korden (tirai).

4.3.7 Pencahayaan pada Rumah Tinggal

Berikut ini beberapa tip untuk pencahayaan rumah tinggal yang disarikan dari Davidson; Karlen, 2004:

Pintu masuk utama:

- Penerangan pada pintu masuk utama terutama dimaksudkan untuk mengarahkan tamu dan menunjukkan letak pintu. Cahaya sekadar cukup untuk berkomunikasi saja (dengan tamu, misalnya), tidak untuk tugas serius (seperti membaca buku).
- Bila menggunakan penyinar atas atau bawah, hindari sinar langsung ke wajah tamu maupun wajah kita sendiri.
- Sebaiknya letak lampu tidak terlalu dekat dengan dinding. Kerumunan serangga di malam hari maupun cicak akan menyebabkan dinding menjadi cepat kotor.
- Letakkan tombol lampu di dekat pintu, di bagian dalam rumah.
- Pintu dari kaca berwarna-warni akan nampak indah di malam hari.

Ruang duduk atau ruang keluarga:

- Penerangan di ruang duduk harus fleksibel karena keaneka-ragaman aktivitas, seperti berbincang dengan teman akrab, membaca, menonton TV, dan mendengarkan musik. Perlu disediakan beberapa colokan listrik untuk lampu-lampu yang berdiri sendiri. Peletakan lampu tepat di tengah langit-langit ruang, seperti yang biasa di-dapati, adalah untuk penyederhanaan instalasi awal saja. Oleh karena itu perlu dirancang ulang, disesuaikan dengan kebutuhan. Kombinasi antara lampu penyinar bawah dengan beberapa lampu meja yang tersebar letaknya akan sangat baik.
- Lampu disesuaikan dengan suasana ruang duduk yang diharapkan. Bila ingin membangun suasana tradisional maka perlu menghindari luminer bergaya futuristik.
- Korden dengan warna gelap akan membuat ruangan terasa sempit. Sebaliknya korden dengan warna muda akan memberi kesan lebih lega dan sejuk.

- Bila nonton TV merupakan aktivitas utama di ruang ini, usahakan lampu tidak terlalu redup. Cahaya TV yang berubah-ubah cepat akan memenatkan mata bila ruangan terlalu gelap (atau terlalu kontras.) Sebaliknya, cahaya yang terlalu terang akan memudarkan gambar TV dan menimbulkan pantulan di layar TV.
- Jika suasana lingkungan sejuk tenang, matikan lampu dan nyalakan-lah lilin. Bayangan cahaya lilin yang redup hangat dan bergoyang lembut terhembus angin akan mengiringi suasana ketika Anda ber-bisik-bisik.

Dapur

- Penerangan dapur terdiri atas penerangan umum dan kerja. Penerangan kerja diletakkan di atas aktivitas racik, masak dan cuci untuk menghindari bayang-bayang badan yang mengganggu bila lampu di belakang kita.
- Lampu fluorescent biasanya disukai karena akan nampak terang dan bersih, hanya saja sering membosankan.
- Lampu di atas kompor akan cepat kotor sehingga kemudahan pembersihan perlu dipikirkan. Bisa dengan cara memberi penutup kaca yang mudah dilepas.
- Dengan semakin banyaknya buku-buku masak yang tersedia, penerangan dapur harus mendukung aktivitas membaca tersebut.
- Usahakan tidak ada sudut-sudut gelap yang akan menjadi tempat persembunyian serangga pengganggu.

Ruang makan

- Ruang makan sering tidak sekadar untuk makan tetapi juga untuk fungsi sosial, misalnya menjamu kerabat. Lampu gantung dengan warna hangat akan memberi suasana akrab dan hangat. Hindari lampu gantung yang terlalu rendah serta mengganggu komunikasi visual antarorang di sekeliling meja. Bila dipakai peralatan makan dari *stainless steel* dan kristal, cahaya beberapa lilin akan menambah kesan anggun gemerlapan.
- Posisikan lampu dekat meja makan, agar membentuk ruang intim yang berfokus di meja makan. Hindari lampu fluorescent. Lampu pijar akan membuat warna makanan lebih matang.

Ruang tidur

- Ruang tidur sangat bersifat pribadi. Penerangan biasanya terdiri dari lampu untuk penerangan umum dan lampu baca di kedua sisi tempat tidur. Lampu baca di sisi tempat tidur ini penting untuk menghindari kejengkelan akibat harus bangkit mematikan lampu ketika sudah sangat mengantuk (setelah rasa kantuk susah payah dicapai dengan membaca).
- Bila ada meja rias, pasang lampu di kiri-kanan kaca. Dua lampu 60 watt lebih baik dari satu lampu 100 watt. Pilihlah lampu pijar biasa, agar kulit tampak wajar.
- Ruang tidur anak bisa diberi penerangan yang membentuk pola warna-warni di langit-langit, tetapi sebaiknya saat tidur lampu dimatikan. Tidur di bawah cahaya terang akan menaikkan risiko kerusakan mata. Keamanan tombol lampu dan colokan harus diperhatikan.
- Ruang tidur remaja perlu penerangan yang dinamis. Saat pertumbuhan jiwa mungkin menuntut kebebasan pengaturan penerangan menurut selera mereka sendiri. Oleh karena itu harus disiapkan jaringan perkabelan yang dapat memberi kebebasan merancang letak lampu tanpa harus menambah risiko bahaya akibat kabel yang centang perentang. Cahaya lampu yang tidak wajar, seperti warna lampu merah, mungkin saja disukai pada saat-saat tertentu (sambil mendengarkan musik metal misalnya!).

Ruang kerja

- Penerangan pada bidang kerja sebaiknya dari arah kiri-kanan meja. Cahaya lampu dari depan akan terpantul di bidang kerja. Sebaliknya, cahaya dari belakang akan menyebabkan bayangan tubuh menutupi bidang kerja.
- Cahaya secukupnya saja (lunak), karena mata akan bekerja relatif lama. Terlalu banyak atau sedikit cahaya akan cepat melelahkan mata.
- Jika bekerja dengan komputer, letakkan lampu di kiri belakang atas atau kanan belakang atas untuk menghindari pantulan lampu di layar monitor.

Kamar mandi

- Penerangan dari kiri-kanan kaca (biasanya di atas wastafel). Lampu fluorescent akan memberi kesan bersih (higienis) pada kamar mandi bila dipadu dengan warna-warna terang dan sedikit mengilap.
- Kamar mandi modern dengan *bathtube* bisa dipakai bersantai. Oleh karena itu lampu mungkin perlu disesuaikan dengan kebutuhan untuk membaca (sambil berendam). Tombol lampu sebaiknya memakai tombol tarik (dengan tali), untuk menghindari sengatan listrik akibat tangan basah.
- Hindari sudut-sudut gelap yang disukai serangga.

Gudang

- Penerangan dengan lampu pijar dan diberi pelindung terhadap benturan.

Garasi

- Penerangan dengan lampu pijar yang dapat dihubungkan dengan sensor gerak sehingga lampu akan menyala secara otomatis bila ada objek bergerak di dekatnya. Perlengkapan *time-delay* akan mematikan lampu setelah beberapa saat tidak ada gerakan.

Taman

- Penerangan dimaksudkan untuk keamanan dan estetik. Agar hemat energi, lampu dapat dihubungkan dengan sensor cahaya (hanya akan menyala bila hari gelap). Bisa juga dengan sensor gerak sehingga lampu akan menyala otomatis bila ada objek bergerak melintas (seperti tamu tak diundang). Perlu kompromi dengan tetangga agar tidak saling mengganggu.
- Penerangan taman memakai luminer yang tahan cuaca dan sebaiknya letak luminer tersembunyi. Bayangan ranting dan dedaunan pada dinding rumah atau pagar akan dramatis. Fungsi utamanya adalah untuk aksen. Lampu dengan cahaya sekitar warna biru akan lebih mendramatisasi suasana bila langit sedang biru.
- Untuk kolam dapat dipakai luminer khusus kedap air yang dapat direndam. Efek gerak air akan bagus.

- Jalan setapak bisa dicahayai dengan lampu yang diletakkan rendah dan terutama pada tempat-tempat berbahaya (licin, perbedaan ketinggian, dll.)
- Perlu dipertimbangkan limpahan cahaya dari dalam rumah ke luar ruang sehingga pemakaian lampu efisien.
- Bila memungkinkan, pakailah lampu dengan tegangan rendah.
- Meletakkan lampu di tengah kolam akan mengundang serangga mendekat di waktu malam.

4.3.8 Pencahayaan untuk Kantor

Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan pada pencahayaan kantor adalah sebagai berikut:

- Pencahayaan sebaiknya menggabungkan pencahayaan umum dan lokal. Pencahayaan umum memanfaatkan sumber-sumber cahaya tersembunyi di langit-langit, sedangkan pencahayaan lokal memakai lampu-lampu di meja-meja kerja. Pencahayaan umum dari lampu-lampu yang disebar merata di langit-langit saja cenderung membosankan, selain tidak hemat energi. Sebaliknya memakai lampu meja saja akan menyebabkan kontras penerangan menjadi tinggi dan secara umum ruangan menjadi gelap (walau energi dapat dihemat karena lampu hanya menyala bila dibutuhkan). Pada sistem gabungan, cahaya langit-langit hanya untuk mengisi penerangan minimal saja.
- Kontras antara tulisan dengan kertas harus baik. Huruf hitam di kertas biru tua tentu bukan kontras yang baik untuk membaca. Setiap pengurangan kontras 1% membutuhkan kompensasi penerangan 15% lebih terang agar dicapai kejelasan yang sama.
- Besar huruf akan menentukan kejelasan. Huruf-huruf kecil tentu membutuhkan penerangan lebih tinggi dibanding huruf-huruf besar. Sebaiknya ukuran huruf minimal 8 poin. Ukuran 10 poin atau lebih sangat dianjurkan untuk tugas membaca dalam waktu lama.
- Kesilauan dapat dibagi menjadi kesilauan langsung (ke arah sumber cahaya; sudut 45-90°) dan tak langsung (dari pantulan; 0-45°). Umumnya di depan meja kerja mata manusia bergerak antara sudut 0-45° dengan sudut terbanyak di sudut 25°. Karena itu kemungkinan terbanyak adanya pantulan dengan sudut 25° ini perlu diperhatikan.

- Penerangan untuk bidang vertikal, seperti monitor komputer (terutama CRT, *Cathode Ray Tube*), harus memperhatikan sudut pantulan. Lampu yang tersembunyi akan sangat menguntungkan (misalnya lampu fluorescent di langit-langit dengan kisi-kisi) untuk menghindari pantulan pada kaca layar monitor. Perhatikanlah bahwa kaca layar monitor akan memantulkan benda-benda mengilap atau berpendar di sekitarnya, termasuk bayangan pakaian dan wajah si pemakai, yang akan mengganggu kejelasan monitor. Posisi lampu di depan akan melelahkan mata karena posisi mata yang mengarah ke layar komputer vertikal juga akan menangkap terlalu banyak sinar dari lampu, sedang posisi lampu di belakang ada kemungkinan memantul ke layar kaca.
- Pekerjaan di kantor bisa berlangsung terus-menerus. Oleh karena itu usahakan intensitas penerangan tepat. Penerangan yang terlalu banyak, atau terlalu sedikit, sama-sama akan melelahkan mata.
- Untuk menghindari ketidak-nyamanan karena kesilauan maka usahakanlah perbandingan terang antara objek dengan lingkungan dekatnya 3:1; objek dengan bidang gelap yang terletak agak jauh 5:1; objek dengan bidang terang yang terletak agak jauh 1:5.

4.3.9 Penerangan untuk Rumah Makan

- Penerangan pada rumah makan ditujukan untuk membentuk suasana santai, agar pengunjung betah. Rumah makan untuk keluarga agak berbeda dengan rumah makan untuk pengunjung dewasa. Rumah makan keluarga (bapak, ibu dan anak-anak) cenderung terang dan berkesan meriah. Rumah makan untuk orang dewasa lebih berkesan tenang, membentuk citra kelas tertentu, dan memungkinkan untuk membangun suasana khusus, romantis, *elegant*, *excecutive*. Oleh karena itu cahaya hangat lembut yang terkonsentrasi di meja-meja makan akan lebih baik. Lampu-lampu kecil dan lilin akan menguatkan suasana *elegant* yang terpantul pada perlengkapan makan dari kristal dan *stainless steel*.
- Penerangan untuk kedai *fastfood* mempunyai konsep berbeda. Di sini penerangan justru dibuat agar pengunjung tidak betah tinggal berlama-lama karena memang harus cepat ganti dengan pelanggan lain.

4.3.10 Penerangan untuk *Nightclub*

Penerangan untuk nightclub bisa dibuat bermacam-macam. Konsep *ingin melupakan sejenak dunia nyata* akan membawa ke rancangan pencahayaan yang sangat artifisial, terutama untuk diskotik.

4.4 Aspek Matematis

Ada dua cara menghitung penerangan yang umumnya dilakukan, yaitu yang disebut cara titik demi titik (*point-by-point method*) dan lumen (*lumen method*). Cara pertama sangat sederhana dan digunakan untuk menghitung penerangan dari sumber cahaya yang dapat dianggap sebagai titik, misalnya penerangan sebuah lampu ke bidang kerja atau ke lukisan di dinding. Cara ini mengabaikan faktor pantulan dari permukaan sekitar. Sedang cara kedua lebih panjang dan digunakan untuk menghitung penerangan dari sumber cahaya yang berbentuk bidang, seperti fluorescent di langit-langit. Sebelum membahas perhitungan pencahayaan, kita akan mengenali beberapa perhitungan lain yang sering diperlukan dalam desain pencahayaan.

4.4.1 Kontras

$$C = (L_t - L_s)/L_s$$

dengan C = kontras (*contrast*), tanpa dimensi
L_t = luminan pada objek bersangkutan, cd/m^2
L_s = luminan permukaan sekitar objek bersangkutan, cd/m^2

atau bila yang diketahui bilangan pantul permukaan:

$$C = (\rho_t - \rho_s)/\rho_s$$

dengan C = kontras (*contrast*), tanpa dimensi
ρ_t = reflektan (pantulan) objek bersangkutan, cd/m^2
ρ_s = reflektan (pantulan) permukaan sekitar objek bersangkutan, cd/m^2

4.4.2 Luminan (Kecerahan atau *Brightness*)

Pada subbab ini dibahas luminan pada permukaan tak transparan dan luminan pada permukaan transparan.

4.4.2.1 Luminan Permukaan Tak Transparan

$$L = E.\rho \text{ cd/m}^2$$

dengan L = luminan, cd/m^2
E = iluminan, lumen/m^2
ρ = reflektan permukaan, %

4.4.2.2 Luminan Permukaan Transparan

$$L = E.\tau \text{ cd/m}^2$$

dengan L = luminan, cd/m^2
E = Iluminan, lumen/m^2
τ = transmitan permukaan, %

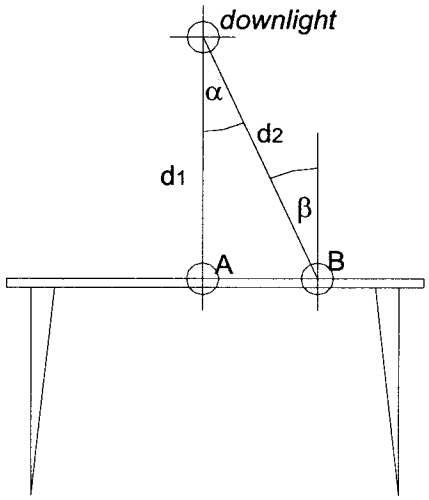
4.4.3 Metode Titik (*Point to Point Method*)

Pada subbab ini dibahas bagaimana menghitung iluminasi di satu titik oleh satu pengatur lampu dan menghitung iluminasi di satu titik dengan beberapa lampu.

4.4.3.1 Menghitung Iluminasi di Satu Titik oleh Satu Lampu

$$E = I/d^2\cos\beta \text{ lux}$$

dengan E = Iluminasi, lux (lm/m^2)
I = Arus cahaya dari sumber cahaya ke arah titik yang disinari, lm, (biasanya tertera sebagai data teknis lampu yang diterbitkan oleh pabrik pembuatnya)
d = Jarak dari lampu ke titik di bidang yang disinari, m
β = Sudut datang sinar (dihitung antara garis tegak lurus bidang dan sinar)



***Gambar 4.16** Iluminasi oleh satu titik lampu*

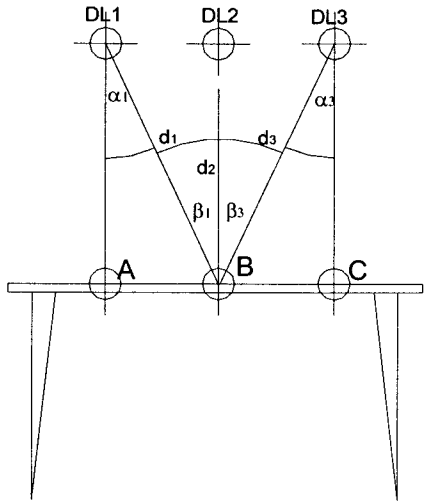
Bila data lampu dari pabrik yang tersedia dalam *candle*, maka I dalam candle, d dalam feet dan E dalam footcandle (lumen/ft^2). Untuk mencari E dalam lux, kalikan hasil dengan bilangan 10.

4.4.3.2 Menghitung Iluminasi di Satu Titik oleh Beberapa Lampu

Menurut hukum Abney, iluminasi dapat dijumlahkan sebagai berikut:

$$E_T = I_1 / d_1^2 \cos\beta_1 + I_2 / d_2^2 \cos\beta_2 + I_n / d_n^2 \cos\beta_n$$

Dengan E_T = Iluminasi total, lux (lm/m^2)
$I_1 \ldots I_n$ = Intensitas sumber cahaya ke arah titik yang disinari, lm, (biasanya tertera sebagai data teknis lampu yang diterbitkan oleh pabrik pembuatnya)
$d_1 \ldots d_n$ = Jarak dari masing-masing lampu ke titik di bidang yang disinari, m
$\beta_1 \ldots \beta_2$ = Sudut datang sinar masing-masing lampu (dihitung antara garis tegak lurus bidang dan sinar)



***Gambar 4.17** Iluminasi oleh beberapa titik lampu*

4.4.4 Metode Lumen (*Lumen Method* atau *Zonal Cavity Method*, ZCM)

Cara ini agak panjang dan terkesan rumit, tetapi sebenarnya mudah. Seperti halnya pada cara titik demi titik, pada cara lumen juga dibutuhkan data teknis lampu yang biasanya dapat diminta dari pabrik pembuatnya. Bila data teknis tidak tersedia, dapatlah dipakai data teknis yang dimuat dalam buku-buku tentang pencahayaan buatan. Tapi tentu saja data teknis dari pabrik pembuat lampu bersangkutan lebih akurat. Yang lebih mudah dan cepat adalah melalui Internet.

Untuk mempermudah pemahaman maka akan sedikit dipaparkan perjalanan ke rumus akhir. Untuk menghitung penerangan di satu titik oleh suatu sumber cahaya, kita punya rumus hubungan:

$$E = \Phi / A$$

dengan E = penerangan rata-rata, lux
Φ = total arus cahaya di bidang bersangkutan, lumen
A = luas area, m^2

Dalam kenyataannya, menghitung penerangan tidak semudah itu. Banyak faktor yang memengaruhi penerangan di suatu titik, antara lain distribusi intensitas cahaya luminer, efisiensi, bentuk dan ukuran ruang,

pemantulan permukaan dan ketinggian lampu dari bidang kerja. Untuk itu pada rumus tadi perlu ditambahkan satu faktor lagi, yaitu **CU** (*coefficient of utilization*, koefisien penggunaan). Agar pembaca terbiasa dengan istilah-istilah yang kelak akan dijumpai di brosur dan buku-buku tentang pencahayaan, maka istilah-istilah dipertahankan dalam bahasa dan singkatan internasionalnya.

Jadi rumusnya menjadi: **$E = \Phi.CU/A$**

Dalam perjalanan hidupnya, terang lampu akan berkurang oleh timbunan debu pada luminer dan bahkan juga menyusutnya lumen yang dikeluarkan oleh lampu. Oleh karena itu kita perlu menambahkan satu faktor lagi pada rumus dengan **LLF** (*light-loss factor*, faktor kehilangan cahaya).

Rumus menjadi: **$E = \Phi.CU.LLF/A$**

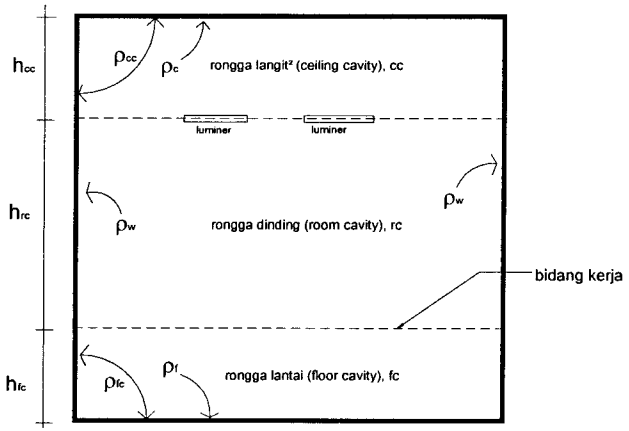
untuk menghitung kuat penerangan, rumusnya menjadi $E = (L.N).CU.LLF/A$

dengan L = total lumen awal per luminer
N = jumlah luminer

Bila ingin menghitung jumlah luminer maka:

Rumus 2. 1

$N = (E)(A)/(L)(CU)(LLF)$



***Gambar 4.18** Pembagian ruang untuk perhitungan dengan metode lumen*

Penghitungan CU cukup panjang. Pada cara ini ruang dibagi menjadi tiga zona, dinamai rongga langit-langit (*ceiling cavity*), rongga ruang (*room cavity*) dan rongga lantai (*floor cavity*). Proporsi geometris rongga langit-langit, ruang dan lantai disebut perbandingan rongga (*cavity ratio*). Rumus umumnya:

Rumus 2. 2

Perbandingan rongga = 2,5 h (keliling ruang)/(luas ruang)

Dalam literatur bahasa Inggris ditulis:

Rumus 2. 3

***Cavity ratio* = 2,5 h (*perimeter*)/(*area*)**

Dalam buku-buku tentang pencahayaan mungkin Anda akan mendapati singkatan seperti:

CCR (*Ceiling Cavity Ratio*), perbandingan rongga langit-langit

RCR (*Room Cavity Ratio*), perbandingan rongga ruang

FCR (*Floor Cavity Ratio*), perbandingan rongga lantai

h_c, jarak bidang luminer ke langit-langit (bisa juga diartikan tinggi rongga langit-langit)

h_r, jarak bidang luminer ke bidang kerja (bisa diartikan tinggi rongga ruang)

h_f, jarak bidang kerja ke lantai (bisa diartikan tinggi rongga lantai)

Dengan demikian untuk menghitung CCR (perbandingan rongga langit-langit) kita dapat mengubah Rumus 2. 3 menjadi:

$CCR = 2{,}5\ h_c\ (perimeter)/(area)$

untuk RCR (perbandingan rongga ruang), menjadi:

$RCR = 2{,}5\ h_r\ (perimeter)/(area)$

Begitu juga untuk FCR:

- Untuk ruang berdenah bujur sangkar atau empat persegi panjang:

Rumus 2.4

***Cavity ratio* = 5h(W+L)/(WL)**

- Untuk ruang berdenah bentuk L:

Rumus 2.5

***Cavity ratio* = 5h(W+L)/(WL – XY)**

- Untuk ruang berdenah segitiga:

Rumus 2.6

***Cavity ratio* = 2,5h(A+B+C)/(0,5BC)**

- Untuk ruang berdenah lingkaran:

Rumus 2.7

***Cavity ratio* = 5h/r**

- Untuk ruang berdenah segi enam:

Rumus 2.8

***Cavity ratio* = 5,76h/L**

Harga CU sangat tergantung pada bilangan pantul permukaan. Pada umumnya bila bilangan pantul permukaan langit-langit, ruang dan lantai semakin tinggi, nilai CU juga semakin tinggi. Bila permukaan-permukaan ruang mempunyai bilangan pantul berbeda-beda maka kita terpaksa mencari bilangan pantul rata-rata:

Rumus 2.9

$$\rho = (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + ... + \rho_n A_n)/(A_1 + A_2 + ... + A_n)$$

Langkah selanjutnya adalah mencari yang dinamakan sebagai *Effective Cavity Reflectance* (bilangan pantul rongga efektif). Memang pada kenyataannya bilangan pantul rongga langit-langit dan lantai tidaklah sama dengan bilangan pantul permukaan-permukaan tersebut secara langsung. Kedalaman rongga langit-langit dan lantai perlu diperhatikan. Dalam buku-buku tentang pencahayaan buatan, pembaca mungkin akan menemui istilah-istilah berikut:

ρ_{cc} (*Effective Ceiling Cavity Reflectance*), bilangan pantul rongga langit-langit efektif.

ρ_{fc} (*Effective Wall Cavity Reflectance*), bilangan pantul rongga ruang efektif.

ρ_{fc} (*Effective Floor Cavity Reflectance*), bilangan pantul rongga lantai efektif.

Untuk langit-langit yang tidak horizontal kita memiliki rumus:

Rumus 2.10

$$\rho_{cc} = \rho_c A_0/(A_s - \rho_c A_s + \rho_c A_0)$$

dengan A_o = luas bukaan langit-langit
A_s = luas permukaan langit-langit
ρ_c = bilangan pantul permukaan langit-langit

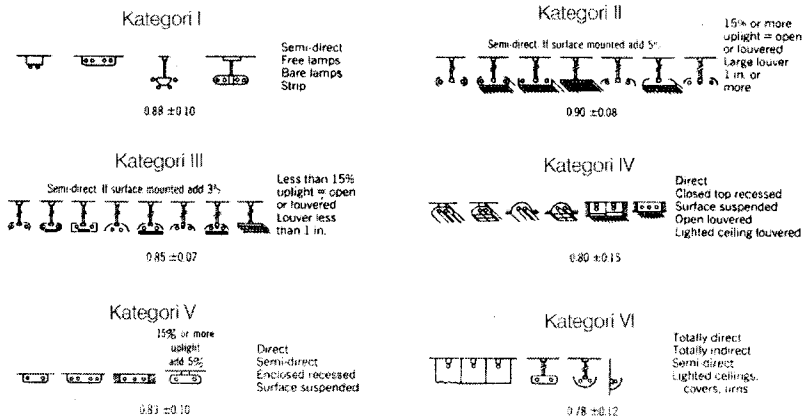
Setelah menemukan CU, kita perlu menghitung LLF (*Light-Loss Factor*, Faktor Kehilangan Cahaya). LLF terdiri atas *nonrecoverable factor* dan *recoverable factor*.

Nonrecoverable factor terdiri atas:

- **LAT** (*Luminaire Ambient Temperature*), suhu di sekitar luminer. Di atas suhu 25°C, lampu fluorescent akan kehilangan cahaya 1% setiap kenaikan suhu 1°C. Jika lampu beroperasi di lingkungan normal, sesuai desain pabrik, maka LAT = 1. Pengertian lingkungan normal sesuai arahan pabrik pembuat lampu tersebut.
- **VV** (*Voltage Variation*), variasi tegangan listrik. Perubahan 1% pada tegangan listrik akan memengaruhi lumen lampu pijar hingga 3%. Jika lampu dioperasikan pada voltase sesuai desainnya maka VV = 1.
- **LSD** (*Luminaire Surface Depreciation*), depresiasi permukaan luminer. Permukaan luminer akan mengalami penurunan kualitas, seperti misalnya penutup berubah warna, reflektor tergores, dan sebagainya, yang akan memengaruhi kualitas dan kuantitas penerangan.
- **BF** (*Ballast Factor*), faktor balas. Kadang balas yang digunakan dalam luminer berbeda dengan yang tercantum dalam data teknis. Hal ini sering menyebabkan kekeliruan penghitungan.

Recoverable factor meliputi:

- **LDD** (*Luminaire Dirt Depreciation*), depresiasi cahaya akibat penimbunan kotoran pada luminer. LDD dipengaruhi oleh tipe luminer, kondisi atmosfer lingkungan dan waktu antara pembersihan luminer berkala.



Sumber: Stein

Gambar 4.19 *Luminaire Dirt Depreciation, LDD*

- **RSDD** (*Room Surface Dirt Depreciation*), depresiasi cahaya akibat penumpukan kotoran di permukaan ruang. Pencahayaan yang memanfaatkan pemantulan akan lebih mudah terpengaruh oleh penumpukan kotoran (debu, dll.) dibanding pencahayaan yang mengutamakan cahaya langsung dari lampu. Tabel berikut dapat dipergunakan sebagai patokan bila tidak ada data spesifik dari lampu bersangkutan. Tabel ini didasarkan pada periode pembersihan 24 bulan di lingkungan wajar (tidak sangat bersih maupun kotor).

Tabel 4.4 *Room Surface Dirt Depreciation*

Pencahayaan langsung (*direct lighting*)	0,92 ± 5%
Pencahayaan semilangsung (*semi-direct lighting*)	0,87 ± 8%
Pencahayaan langsung-tak-langsung (*direct-indirect lighting*)	0,82 ± 10%
Pencahayaan semi-tidak-langsung (*semi-indirect ligthing*)	0,77 ± 12%
Pencahayaan taklangsung (*Indirect lighting*)	0,72 ± 17%

Sumber: Stein

- **LLD** (*Lamp Lumen Depreciation*), faktor depresiasi lumen yang tergantung pada jenis lampu dan waktu penggantiannya. Bila tidak tersedia data yang pasti, pakailah Tabel 4.5.

Tabel 4.5 *Lamp Lumen Depreciation*

	Penggantian bersamaan	Penggantian berdasar lampu yang mati
Lampu pijar	0,94	0,88
Tungsten-halogen	0,98	0,94
Fluorescent	0,90	0,85
Mercury	0,82	0,74
Metal-halide	0,87	0,80
High-pressure sodium	0,94	0,88

Sumber: Stein

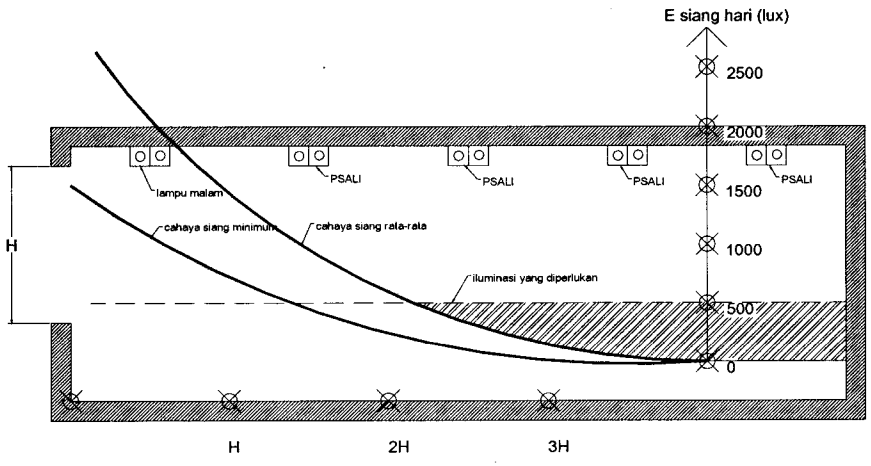
- **LBO** (*Lamp Burnout*), perkiraan jumlah lampu yang mati sebelum waktu penggantian yang direncanakan. LBO = (Jumlah lampu yang masih hidup) : (Jumlah awal lampu yang digunakan). Bila lampu diganti seluruhnya secara bersamaan, LBO = 1. Bila penggantian hanya pada lampu yang mati maka LBO = 0,95.

Dari penjelasan di atas dapat ditulis:

LLF = (LAT)(VV)(LSD)(BF)(LDD)(RSDD)(LLD)(LBO)

Metode Gabungan Antara Pencahayaan Buatan dan Alami (PSALI, *Permanent Supplementary Artificial Lighting, Interiors*)

PSALI adalah strategi untuk menggabungkan pencahayaan alami dan buatan pada suatu ruang. PSALI mengisi bagian ruang yang tidak terjangkau oleh cahaya alami dengan menggunakan lampu. Dengan demikian kita dapat memperoleh iluminasi yang sesuai dengan persyaratan kesehatan dan kenyamanan tanpa harus memboroskan energi. Cara menghitung iluminasi di titik dalam ruangan telah disajikan pada Bab 3 melalui DF (*Daylight Factor*). Titik-titik yang semakin jauh dari jendela akan semakin gelap. Iluminasi di titik gelap ini dapat dinaikkan dengan memasang lampu. Untuk menghitungnya dapat menggunakan metode titik ke titik.



Gambar 4.20 PSALI

4.4.5 Menghitung Kebutuhan Biaya Lampu

Tabel 4.6 Contoh perhitungan

Input (watt)	100W	
Output (Lumen)	10.000 lm	
Efikasi (lumen/watt)	100 LPW	10.000 lm ÷ 100W
Pengoperasian (jam atau hour)	3.120 jam	5 hari/minggu x 12 jam/hari x 52 minggu/tahun
Energi yang digunakan	312.000 Wh	100W x 3,120 jam/tahun
Energi yang digunakan	312kWh	312.000 watt-jam (Wh) ÷ 1,000 = 312 kilowatt-jam (kWh)
Biaya pemakaian /kWh	Rp 400,-	
Biaya pemakaian energi/tahun	Rp 124.800,-	312kWh x Rp 400,-/kWh

4.4.6 Menghitung Panas yang Dikeluarkan Oleh Lampu

$$\mathbf{H = 0{,}996\ I\ watt}$$

dengan H = panas yang ditimbulkan oleh sumber cahaya, Watt
I = daya yang diberikan kepada sumber cahaya (lampu dan balas), watt

4.5 Contoh Perhitungan

Berikut akan disajikan perhitungan sehubungan dengan kontras, luminan permukaan tak transparan, luminan permukaan transparan, iluminasi di bidang kerja oleh satu lampu, dan iluminasi di bidang kerja dengan beberapa lampu, dan menghitung CCR, RCR dan FCR ruang berbentuk kotak, dll.

4.5.1 Menghitung Kontras

Soal: Sebuah buku bacaan terbuka di atas meja yang diterangi lampu. Jika diketahui luminan di buku 500 cd/m^2 dan di meja 200 cd/m^2, berapakah kontras yang terjadi?

Jawab:

Akan digunakan rumus $C = (L_t - L_s)/L_s$

Luminan di buku, $L_t = 500$ cd/m^2.

Luminan di meja, $L_s = 200$ cd/m^2.

Jadi kontras $\mathbf{C = (L_t - L_s)/L_s}$

$= (500 - 200)/200$

$\mathbf{= 1{,}5}$

4.5.2 Menghitung Luminan Permukaan Tak-Transparan

Soal: Sebuah meja kayu mempunyai reflektan 30% (0,3). Bila di atas meja tersebut ada lampu yang memberikan iluminan (penerangan) di atas meja sebesar 500 lux (atau lumen/m^2), berapakah luminan (kecerlangan) permukaan meja tersebut?

Jawab:

Akan digunakan rumus $\mathbf{L = E.\rho.}$

Iluminan di permukaan meja, E = 500 lumen/m^2.
Reflektan permukaan, $\rho = 0{,}3$.

Jadi luminan permukaan meja:

$\mathbf{L = E.\rho}$

$(500)(0{,}3)$

$\mathbf{150\ cd/m^2}$

4.5.3 Menghitung Luminan Permukaan Transparan

Soal:

Kaca susu diterangi oleh lampu yang memberikan iluminasi 600 lux. Berapakan luminan di balik kaca bila trasmitan kaca 70%?

Jawab:

Akan digunakan rumus **L = E.τ.**
Iluminasi, E = 600 lux. Transmitan, τ = 70% (0,7).
Jadi luminan dari balik kaca susu:

$$\mathbf{L = E.\tau}$$
$$= (600)(0,7)$$
$$= \mathbf{420\ cd/m^2}.$$

4.5.4 Menghitung Iluminasi di Bidang Kerja oleh Satu Lampu

Soal:

Sebuah lampu pijar *downlight* mempunyai data fotometrik seperti ***Gambar 4.21***.

a. Hitunglah iluminasi di titik A pada bidang kerja yang berada tepat tegak lurus di bawah lampu sejauh sejauh 2 m.
b. Hitunglah iluminasi di titik B pada bidang kerja yang bersudut 25° dari lampu pijar.

Jawab:

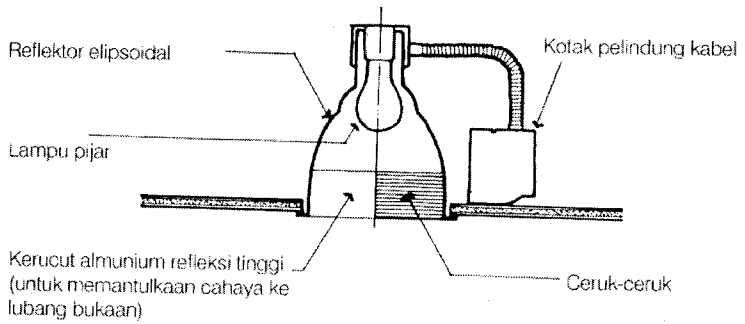
a. Menurut data fotometrik, intensitas lampu pada arah 0° adalah 1950 cd. Jarak d_1 = 2m. Rumus umum metode titik ke titik $E = I/d^2\cos\beta$ lux. Iluminasi di titik A dapat dihitung sebagai berikut:

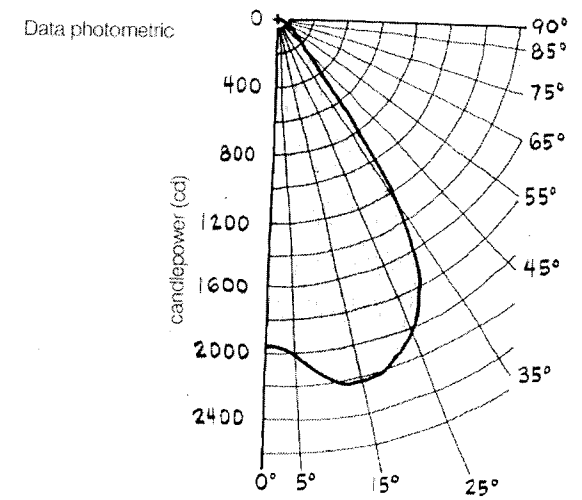
$$\mathbf{E_A} \quad \mathbf{= I_1 / d_1{}^2 \cos\beta\ lux}$$
$$= 1950/(2)^2\cos 0^\circ$$
$$= 1950/(4)(1)$$
$$= \mathbf{487,5\ lux}$$

b. Menurut data fotometrik, intensitas lampu pada arah 25° adalah 2000 cd. Jarak $d_2 = d_1(\sec(\alpha)) = d_1(1/\cos(\alpha)) = d_1(1/\cos(25)) =$ 2 (1/0,91) = 2 (1,1) = 2,2 m. Maka:

$$E_B \quad = I_2 / d_2{}^2 \cos\beta \text{ lux}$$
$$= 2000/(2,2)^2\cos 25^\circ$$
$$= 2000/(4,84)(0,91)$$
$$= \mathbf{454,091\ lux \sim 454,1\ lux}$$

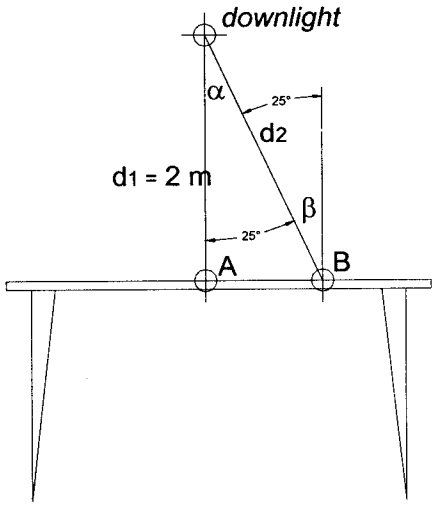
Contoh lampu pijar *downlight* (sebaran sinar lebar)





Sumber: Egan

Gambar 4.21 *Contoh fotometrik*



***Gambar 4.22** Iluminasi oleh satu lampu*

4.5.5 Menghitung Iluminasi di Bidang Kerja oleh Beberapa Lampu

Soal:

Tiga buah *downlight* (DL1, DL2 dan DL3) dengan fotometrik seperti Gambar 4.22 diletakkan sejauh 2 m di atas meja. Titik B terletak tepat di bawah DL2. Sedangkan DL1 dan DL3 berada di sisi kiri dan kanan DL2 sedemikian rupa sehingga terlihat dengan sudut 25° dari titik B. Hitunglah iluminasi di titik B yang diberikan oleh ketiga lampu tadi.

Jawab:

Lihatlah data fotometrik!

$I_1 = 2000$ cd $\quad I_2 = 1950$ cd $\quad I_3 = 2000$ cd

$d_1 = 2{,}2$ m $\quad d_2 = 2$ m $\quad d_3 = 2{,}2$ m

$(d_1 = d_2(\sec\alpha 1) = 2(1{,}1)\text{m} = 2{,}2\text{m}$; karena simetris $d_3 = d_1)$

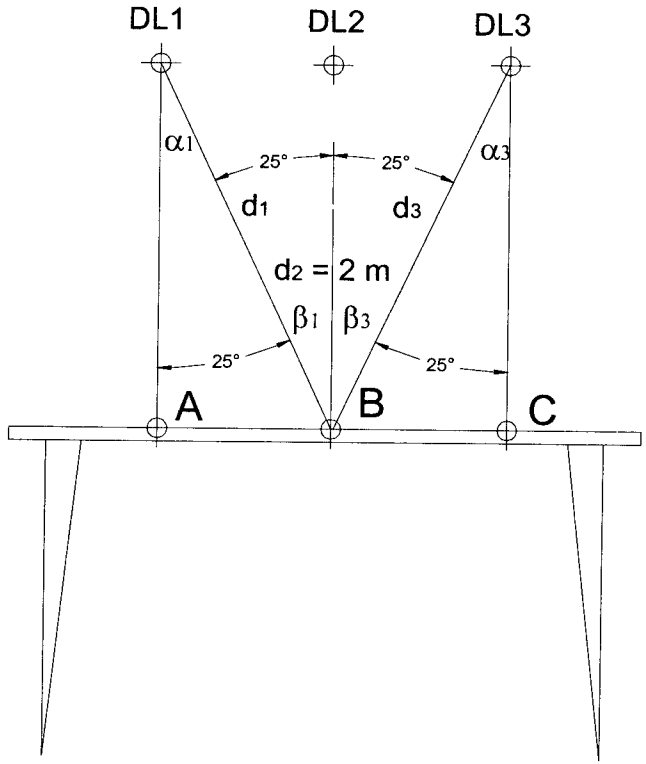
$\beta_1 = 25^\circ \quad \beta_2 = 0 \quad \beta_3 = 25^\circ$

Kita menggunakan hukum Abney untuk iluminasi dari beberapa lampu, yaitu sebagai berikut:

$$E_T = I_1/d_1^2\cos\beta_1 + I_2/d_2^2\cos\beta + I_n/d_n^2\cos\beta_n$$

Iluminasi di titik B:

$$E_B = I_1/d_1^2\cos\beta_1 + I_2/d_2^2\cos\beta_2 + I_3/d_3^2\cos\beta_3$$
$$= 2000/(2{,}2)^2\cos 25^\circ + 1950/(2)^2\cos 0^\circ + 2000/(2{,}2)^2\cos 25^\circ$$
$$= 454{,}1 + 487{,}5 + 454{,}1$$
$$= \mathbf{1395{,}7\ lux}$$



***Gambar 4.23** Iluminasi oleh beberapa lampu*

4.5.6 Menghitung CCR, RCR dan FCR Ruang Berbentuk Kotak

Soal:

Hitung CCR, RCR, dan FCR ruang yang mempunyai ukuran (L)(W)(H) (20m)(10m)(5m). Bidang kerja terletak 1 m di atas lantai, sedang bidang luminer terletak 1 m di bawah langit-langit.

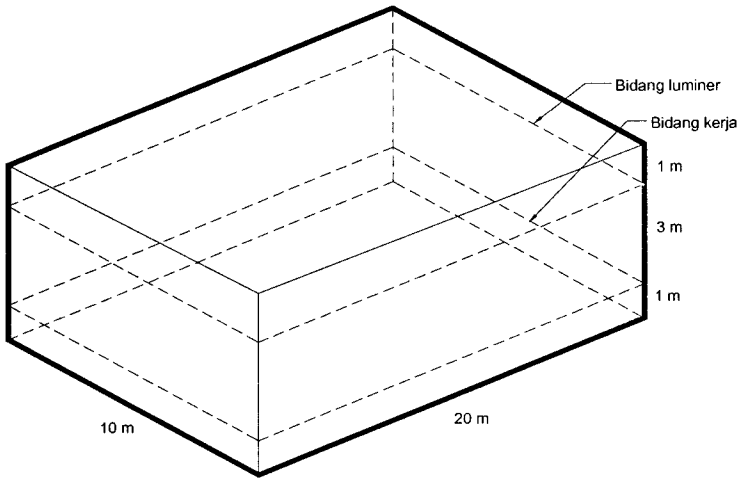
Jawab:

h_c=1m; h_r=3m; h_f=1m.

Untuk denah empat persegi panjang, memakai Rumus 2.4

Cavity ratio = 5h(W+L)/(WL)
CCR = $5h_c$ (W+L)/(WL)
CCR = (5)(1)(10+20)/(10)(20)
= **0,75**

Dengan cara yang sama, memakai h_r=3 dan h_f=1 maka dapat dihitung RCR = **2,25** dan FCR = **0,75**.



Gambar 4.24 *Cavity ratio untuk ruang empat persegi panjang*

4.5.7 Menghitung CCR, RCR dan FCR Ruang Berbentuk L

Soal:

Hitung CCR, RCR dan FCR ruang yang berbentuk L seperti terlihat pada Gambar 4.25.

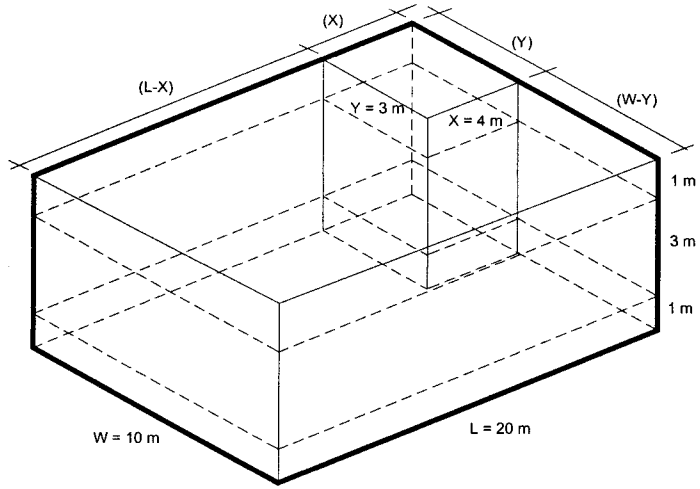
Jawab:

W=10; L=20; X=4; Y=3.
h_c=1; h_r=3; h_f=1.

Karena bentuk denah L kita pakai Rumus 2.5, maka:

Cavity ratio = 5h(W+L)/(WL – XY)
CCR = $5h_c$ (W+L)/(WL – XY)
= (5)(1)(30)/(200 -12)
= **0,79** ~ 0,8

Dengan cara yang sama RCR = **2,39** ~ 2,4 dan FCR = **0,79** ~ 0,8



Gambar 4.25 *Cavity ratio untuk ruang berbentuk L*

4.5.8 Menghitung CCR Ruang Berbentuk Segitiga

Soal:

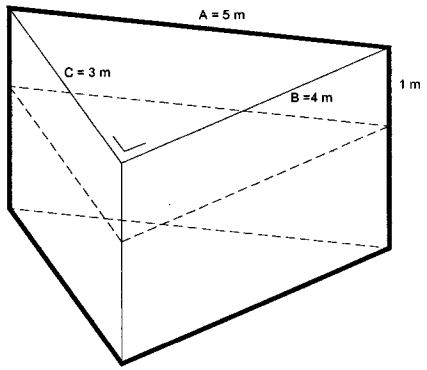
Hitung CCR dari ruang yang berdenah segitiga seperti berikut:

Jawab:

A=3; B=4; C=5; h_c=1.

Untuk denah segitiga kita memakai Rumus 2.6.

Cavity ratio = 2,5h(A+B+C)/(0,5BC)
CCR = $2,5h_c$ (A+B+C)/(0,5BC)
= (2,5)(1)(3+4+5)/(0,5)(4)(5)
CCR = **3**



Gambar 4.26 *Cavity ratio untuk ruang berbentuk prisma segitiga*

4.5.9 Menghitung Bilangan Pantul Rata-rata Permukaan Ruang

Soal:

Hitunglah bilangan pantul rata-rata permukaan ruang jika ruang tersebut memiliki:

- $10m^2$ permukaan berwarna putih, ρ=0,8
- $18m^2$ panel kayu yang berwarna terang, ρ=0,25
- $5m^2$ *wall-paper* bermotif bunga terang, ρ=0,4
- $4m^2$ rak buku dari kayu gelap, ρ=0,15

Jawab:

Untuk menghitung bilangan pantul rata-rata kita memakai Rumus 2.9.

$$\rho = (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + ... + \rho_n A_n)/(A_1 + A_2 + ... + A_n)$$
$$= \{(0,8)(10) + (0,25)(18) + (0,4)(5) + (0,15)(4)\}/(10+18+5+4)$$
$$\rho = \mathbf{0,408} \text{ atau } \mathbf{41\%}$$

4.5.10 Menghitung Bilangan Pantul Rongga Langit-langit Efektif Kubah

Soal:

Hitunglah bilangan pantul rongga langit-langit efektif (ρ_{cc}) ruang yang mempunyai langit-langit berbentuk kubah berjari-jari 10m dan bilangan pantul permukaan langit-langit ρ_c=60%. Bidang luminer terletak di dasar kubah.

Jawab:

r=10; ρ_c=0,6.

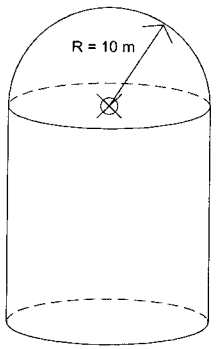
Untuk menghitung ρ_{cc} kita memakai Rumus 2.10.

$$\rho_{cc} = \rho_c A_0/(A_s - \rho_c A_s + \rho_c A_0)$$

$$A_o = \pi r^2$$
$$= 100\pi$$

$$A_s = 2\pi r^2$$
$$= 200\pi$$

$$\rho_{cc} = \rho_c A_0/(A_s - \rho_c A_s + \rho_c A_0)$$
$$= (0,6)(100\pi)/\{200\pi - (0,6)(200\pi) + (0,6)(100\pi)\}$$
$$\rho_{cc} = \mathbf{0,43} \text{ atau } \mathbf{43\%}$$



Gambar 4.27 *Bilangan pantul efektif ruang berkubah*

4.5.11 Menghitung Bilangan Rongga Langit-langit Efektif dengan Luminer di Bawah Dasar Kubah

Soal:

Seperti Contoh 4.5.10 tetapi dengan bidang luminer terletak 2m di bawah dasar kubah, sedang bilangan pantul dinding ruang (yang berbentuk silinder) ρ_w 80%.

Jawab:

r=10; ρ_c=0,6; h_c=2; ρ_w=0,8.

Kita dapat membagi rongga langit-langit menjadi dua bagian, yaitu bagian pertama yang berbentuk kubah dan bagian kedua berbentuk silinder. Karena permukaan kubah dan silinder mempunyai bilangan pantul berbeda maka kita hitung dulu bilangan pantul rata-ratanya dengan Rumus 2.9. Terlebih dulu kita akan menghitung luas kubah dan luas silinder.

Luas kubah $= 2\pi r^2$

$= 200\pi$

Luas dinding silinder $= 2\pi rh$

$= 40\pi$

$\rho = (\rho_1A_1 + \rho_2A_2 + ... + \rho_nA_n)/(A_1 + A_2 + ... + A_n)$
$= \{(0,6)(200\pi) + (0,8)(40\pi)\}/(200\pi + 40\pi)$
ρ = **0,63** atau 63%

$A_o = \pi r^2$
$= 100\pi$

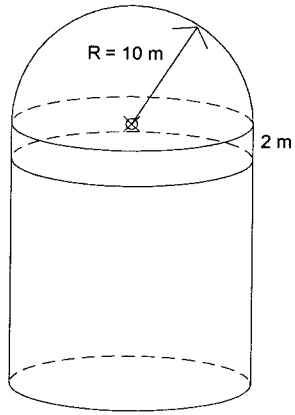
A_s = luas kubah + luas dinding silinder
$= 200\pi + 40\pi$

Untuk menghitung ρ_{cc}, kita memakai Rumus 2.10.

Dari Contoh 5 kita mendapatkan ρ_{cc}= 0,43, yaitu bilangan pantul rongga langit-langit efektif yang berbentuk kubah. ρ_{cc}= 0,43 ini dianggap sebagai bilangan pantul bidang imajiner yang terletak di dasar kubah. Jadi sekarang kita mempunyai ρ_c= 0,43. Padahal rongga langit-langit tersusun dari kubah dan silinder. Untuk itu kita dapat memanfaatkan tabel, tetapi tabel tersebut membutuhkan CCR (*Ceiling Cavity Ratio*, perbandingan rongga langit).

Untuk menghitung CCR silinder dipakai Rumus 2.10:

$\rho_{cc} = \rho_cA_o/(A_s - \rho_cA_s + \rho_cA_o)$
$= (0,63)(100\pi)/\{240\pi - (0,63)(240\pi) + (0,63)(100\pi)\}$
ρ_{cc} = **0,415** atau **41,5%**

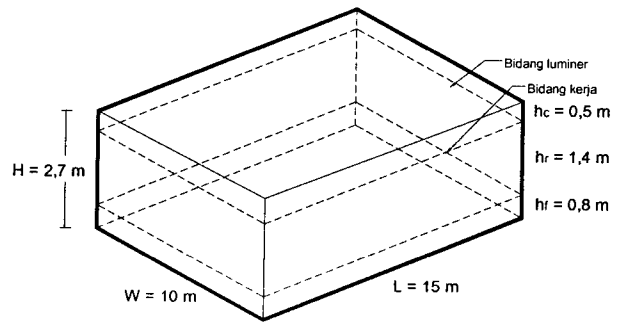


Gambar 4.28 *Cavity ratio untuk ruang berkubah*

4.5.12 Menghitung Kebutuhan Luminer

Soal:

Hitunglah kebutuhan luminer untuk sebuah ruang kantor berukuran L=15m, W=10 dan H=2,7m. Luminer digantung dengan jarak 0,50m dari langit-langit, sedang meja kerja memakai ketinggian standar, 0,80m. Bilangan pantul langit-langit 80%, dinding ruang 50% dan lantai 20%. Luminer yang dipakai adalah jenis luminer untuk lampu fluorescent bereflektor almunium baur, dengan 2 lampu masing-masing menghasilkan arus cahaya 3200 lumen. Kebutuhan penerangan di bidang kerja disesuaikan dengan kebutuhan untuk membaca menulis sehingga disediakan 500 lux. Bila diperlukan iluminasi lebih tinggi maka dapat digunakan lampu meja!



Gambar 4.29 *Ruang kantor*

Jawab:

L=15m; W=10m; H=2,7m.

h_c=0,5m; h_r=1,4m; h_f=0,8m.

E=500lux

ρ_c=0,8 (80%)

ρ_w=0,5 (50%)

ρ_f=0,2 (20%)

Dengan memakai Rumus 2.4 dapat dihitung CCR=0,42, RCR=1,17 dan FCR=0,67.

Kemudian dengan ρ_c=0,8, ρ_w=0,5 dan CCR=0,42 maka dari **Error! Reference source not found.** dapat diperoleh ρ_{cc}=73,7% (dengan interpolasi, lihat cara interpolasi di bawah!) Sedang dengan ρ_f=0,2, ρ_w=0,5 dan FCR=0,67 dapat diperoleh ρ_{fc}=19%, dibulatkan menjadi 20%. Hal ini untuk memudahkan saja. Kebanyakan data teknis yang disertakan pabrik memberikan CU untuk ρ_f=0,2 (bilangan pantul permukaan lantai 20%). Tapi bila kita memiliki bilangan pantul permukaan lantai bukan 20%, maka CU perlu dikalikan dengan faktor seperti yang tertera dalam Tabel 4.9.

Dengan ρ_{cc}=73,7%, ρ_{fc}=20%, RCR=1,17 dan ρ_w=50% maka dari data teknis luminer keluaran pabrik (seperti dalam contoh; lihat lampu No. 26 pada Gambar 4.34) diperoleh CU=81,7%.

Setelah menemukan CU kita akan menghitung LLF. Lampu yang kita pilih termasuk kategori II, sedang kondisi lingkungan termasuk kategori *clean*. Untuk jangka waktu pembersihan luminer 12 bulan dapat ditemukan LDD=0,88; RSDD=0,976; LLD=0,9; LBO=1,0.

Jadi LLF = (*nonrecoverable factor*)(*recoverable factor*)
= (1,0){(LDD)(RSDD)(LLD)(LBO)}
= (1,0){(0,88)(0,976)(0,9)(1,0)
= 0,77

Hingga di sini kita memiliki:
E=500lux
A=150m^2
L=2(3200)lumen
CU=0,817
LLF=0,77

memakai Rumus 2. 1:

N = (E)(A)/(L)(CU)(LLF)
= (500)(150)/(2)(3200)(0,817)(0,77)
= **18,63** dibulatkan menjadi **18** luminer (karena kalau dibulatkan 19 maka pengaturan deret luminer lebih sulit!).

Perlu diingat kemudian bahwa 500 lux tersebut adalah penerangan di saat lampu cahaya sudah mengalami penyusutan (diwakili oleh faktor LLF). Dengan demikian di saat awal penerangan, meja kerja memperoleh penerangan sebesar 649 lux, yaitu dari (500/0,77) lux.

Cara interpolasi

Karena kita akan menghitung ρ_{cc} (Effective Ceiling Cavity Reflectance) maka untuk Base Reflectance kita gunakan ρ_c (Ceiling Reflectance), Wall Reflectance kita pakai ρ_w dan Cavity Ratio kita pakai CCR (Ceiling Cavity Ratio).

ρ_c	80
ρ_w	50
CCR	
.	
.	
0,4	74
0,42	ρ_{cc}
0,6	71
.	
.	

ρ_{cc} = [{(0,6-0,42)/(0,6-0,4)}(74-71)] + 71
= [{(0,18)/(0,2)}(3)] + 71
= **73,7%**

Untuk menghitung CU kita lihat lampu No. 26 (lihat Gambar 4.34).

ρ_{cc}	80	73,7	70
ρ_w	50	50	50
RCR			
.			
1	0,85		0,82
1,17	CU_1	CU	CU_2
2	0,76		0,74
.			
.			

CU_1= [{(2-1,17)/(2-1)}(0,85-0,76)] + 0,76
= [{0,83)/(1)}(0,09)] + 0,76
= 0,8347

CU_2= [{(2-1,17)/(2-1)}(0,82-0,74)] + 0,74
= [{0,83)/(1)}(0,08)] + 0,76
= 0,8064

CU= [{(73,7-70)/(80-70)}(0,8347-0,8064)] + 0,8064
= [{3,7)/(10)}(0,0283)] + 0,8064
= **0,817** atau **81,7%**

Faktor pengali untuk ρ_{fc} 30%

ρ_{cc}	80	73,7	70
ρ_w	50	50	50
RCR			
.			
1	1,082		1,070
1,17	FP_1	FP	FP_2
2	1,066		1,057
.			
.			

FP_1 = [{(2-1,17)/(2-1)}(1,082-1,066)] + 1,066
= [{0,83)/(1)}(0,016)] + 1,066
= 1,07928

FP_2 = [{(2-1,17)/(2-1)}(1,070-1,057)] + 1,057
= [{0,83)/(1)}(0,013)] + 1,057
= 1,06779

FP = [{(73,7-70)/(80-70)}(1,07928-1,06779)] + 0,8064
= [{3,7)/(10)}()] + 1,06779
= 1,0720413

ρ_{fc} 30% --> FP = 1,0720

ρ_{fc} 20% --> FP = 1

ρ_{fc} 19% -->
= 1,0720 - [{(30-19)/(30-20)}(1,0720-1)]
= 1,0720 - [{11)/(10)}(0,0720)]
= 0,9928

Jadi CU = (0,9928)(81,7)
= 81,11176%

N = (E)(A)/(L)(CU)(LLF)
= (500)(150)/(2)(3200)(0,81117)(0,77)
= **18,7619** dibulatkan menjadi 18 luminer

Ternyata tidak terlalu jauh berbeda!

Tabel 4.7 Tabel IES untuk Metode Lumen (Sumber: Egan, 1983)

Percent Effective Ceiling or Floor Cavity Reflectances for Various Reflectance Combinations

Per Cent Base* Reflectance	90										80										70										60										50									
Per Cent Wall Reflectance	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Cavity Ratio																																																		
0.2	89	88	88	87	86	85	85	84	84	82	79	78	78	77	77	76	76	75	74	72	70	69	68	68	67	67	66	66	65	64	60	59	59	59	58	57	56	56	55	53	50	50	49	49	48	48	47	46	46	44
0.4	88	87	86	85	84	83	81	80	79	78	79	77	76	75	74	73	72	71	70	68	69	68	67	66	65	64	63	62	61	58	60	59	59	58	57	55	54	53	52	50	50	49	48	48	47	46	45	45	44	42
0.6	87	86	84	82	80	79	77	76	74	73	78	76	75	73	71	70	68	66	65	63	69	67	65	64	63	61	59	58	57	54	60	58	57	56	55	53	51	51	50	46	50	48	47	46	45	44	43	42	41	38
0.8	87	85	82	80	77	75	73	71	69	67	78	75	73	71	69	67	65	63	61	57	68	66	64	62	60	58	56	55	53	50	59	57	56	55	54	51	48	47	46	43	50	48	47	45	44	42	40	39	38	36
1.0	86	83	80	77	75	72	69	66	64	62	77	74	72	69	67	65	62	60	57	55	68	65	62	60	58	55	53	52	50	47	59	57	55	53	51	48	45	44	43	41	50	48	46	44	43	41	38	37	36	34
1.2	85	82	78	75	72	69	66	63	60	57	76	73	70	67	64	61	58	55	53	51	67	64	61	59	57	54	50	48	46	44	58	56	54	51	49	46	44	42	40	38	50	47	45	43	41	39	36	35	34	29
1.4	85	80	77	73	69	65	62	59	57	52	76	72	68	65	62	59	55	53	50	48	67	63	60	58	56	51	47	45	44	41	59	56	53	49	47	44	41	39	38	36	50	47	45	42	40	38	35	34	32	27
1.6	84	79	75	71	67	63	59	56	53	50	75	71	67	63	60	57	53	50	47	44	67	62	59	56	53	47	45	43	41	38	59	55	52	48	45	42	39	37	35	33	50	47	44	41	39	36	33	32	30	26
1.8	83	78	73	69	64	60	56	53	50	48	75	70	66	62	58	54	50	47	44	41	66	61	58	54	51	46	42	40	38	35	58	55	51	47	44	40	37	35	33	31	50	46	43	40	38	35	31	30	28	25
2.0	83	77	72	67	62	58	53	50	47	43	74	69	64	60	56	52	48	45	41	38	66	60	56	52	49	45	40	38	36	33	58	54	50	46	43	39	35	33	31	29	50	46	43	40	37	34	30	28	26	24
2.2	82	76	70	65	59	54	50	47	44	40	74	68	63	58	54	49	45	42	38	35	66	60	55	51	48	43	38	36	34	32	58	53	49	45	42	37	34	31	29	28	50	46	42	38	36	33	29	27	24	22
2.4	82	75	69	64	58	53	48	45	41	37	73	67	61	56	52	47	43	40	36	33	65	60	54	50	46	41	37	35	32	30	58	53	48	44	41	36	32	30	27	26	50	46	42	37	35	31	27	25	23	21
2.6	81	74	67	62	56	51	46	42	38	35	73	66	60	55	50	45	41	38	34	31	65	59	54	49	45	40	35	33	30	28	58	53	48	43	39	35	31	28	26	24	50	46	41	37	34	30	26	23	21	20
2.8	81	73	66	60	54	49	44	40	36	34	73	65	59	53	48	43	39	36	32	29	65	59	53	48	43	38	33	30	28	26	58	53	47	43	38	34	29	27	24	22	50	46	41	36	33	29	25	22	20	19
3.0	80	72	64	58	52	47	42	38	34	30	72	65	58	52	47	42	37	34	30	27	64	58	52	47	42	37	32	29	27	24	57	52	46	42	37	32	28	25	23	20	50	45	40	36	32	28	24	21	19	17
3.2	79	71	63	56	50	45	40	36	32	28	72	65	57	51	45	40	35	33	28	25	64	58	51	46	40	36	31	28	25	23	57	51	45	41	36	31	27	23	22	18	50	44	39	35	31	27	23	20	18	16
3.4	79	70	62	54	48	43	38	34	30	27	71	64	56	49	44	39	34	32	27	24	64	57	50	45	39	35	29	27	24	22	57	51	45	40	35	30	26	23	20	17	50	44	39	35	30	26	22	19	17	15
3.6	78	69	61	53	47	42	36	32	28	25	71	63	54	48	43	38	32	30	25	23	63	56	49	44	38	33	28	25	22	20	57	50	44	39	34	29	25	22	19	16	50	44	39	34	29	25	21	18	16	14
3.8	78	69	60	51	45	40	35	31	27	23	70	62	53	47	41	36	31	28	24	22	63	56	49	43	37	32	27	24	21	19	57	50	43	38	33	29	24	21	19	15	50	44	38	34	29	25	21	17	15	13
4.0	77	69	58	51	44	39	33	29	25	22	70	61	53	46	40	35	30	26	22	20	63	56	48	42	36	31	26	23	20	17	57	49	42	37	32	28	23	20	18	14	50	44	38	33	28	24	20	17	15	12
4.2	77	62	57	50	43	37	32	28	24	21	69	60	52	45	39	34	29	25	21	18	62	55	47	41	35	30	25	22	19	16	56	49	42	37	32	27	22	19	17	14	50	43	37	32	28	24	20	17	14	12
4.4	76	61	56	49	42	36	31	27	23	20	69	60	51	44	38	33	28	24	20	17	62	54	46	40	34	29	24	21	18	15	56	49	42	36	31	27	22	19	18	13	50	43	37	32	27	23	19	16	13	11
4.6	76	60	55	47	40	35	30	26	22	19	69	59	50	43	37	32	27	23	19	15	62	53	45	39	33	28	24	21	17	14	56	49	41	35	30	26	21	18	16	13	50	43	36	31	26	22	18	15	13	10
4.8	75	59	54	46	39	34	28	25	21	18	68	58	49	42	36	31	26	22	18	14	62	53	45	38	32	27	23	20	16	13	56	48	41	34	29	25	21	18	15	12	50	43	36	31	26	22	18	15	12	09
5.0	75	59	53	45	38	33	28	24	20	16	68	58	48	41	35	30	25	21	18	14	61	52	44	36	31	26	22	19	16	12	56	48	40	34	28	24	20	17	14	11	50	42	35	30	25	21	17	14	12	09
6.0	73	61	49	41	34	29	24	20	16	11	66	55	44	38	31	27	22	19	15	10	60	51	41	35	28	24	19	16	13	09	55	45	37	31	25	21	17	14	11	07	50	42	34	29	23	19	15	13	10	06
7.0	70	58	45	38	30	27	21	18	14	08	64	53	41	35	28	24	19	16	12	07	58	48	38	32	26	22	17	14	11	06	54	43	35	30	24	20	15	12	09	05	49	41	32	27	21	18	14	11	08	05
8.0	68	55	42	35	27	23	18	15	12	06	62	50	38	32	25	21	17	14	11	05	57	46	35	29	23	19	15	13	10	05	53	42	33	28	22	18	14	11	08	04	49	40	30	25	19	16	12	10	07	03
9.0	66	52	38	31	25	21	16	14	11	05	61	49	36	30	23	19	15	13	10	04	56	45	33	27	21	18	14	12	09	04	52	40	31	26	20	16	12	10	07	03	48	39	29	24	18	15	11	09	07	03
10.0	65	51	36	29	22	19	15	11	09	04	59	46	33	27	21	18	14	11	08	03	55	43	31	25	19	16	12	10	08	03	51	39	29	24	18	15	11	09	07	02	47	37	27	22	17	14	10	08	06	02

* Ceiling, floor or floor of cavity.

*The tables in this appendix section have been reproduced with the permission of the Illuminating Engineering Society of North America (IES).

Tabel 4.8 Tabel IES... (lanjutan)

Per Cent Base* Reflectance	40										30										20										10										0									
Per Cent Wall Reflectance	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Cavity Ratio																																																		
0.2	40	40	39	39	39	38	38	37	36	36	31	31	30	30	29	29	29	28	28	27	21	20	20	20	20	20	19	19	19	17	11	11	11	10	10	10	09	09	09	08	02	02	02	01	01	01	01	00	00	0
0.4	41	40	39	39	38	37	36	35	34	34	31	31	30	30	29	28	28	27	26	25	22	21	20	20	20	19	19	18	18	16	12	11	11	11	11	10	10	09	09	08	04	03	03	02	02	02	01	01	00	0
0.6	41	40	39	38	37	36	34	33	32	31	32	31	30	29	28	27	26	26	25	23	23	21	21	20	19	19	18	18	17	15	13	13	12	11	11	10	10	09	08	08	05	05	04	03	03	02	02	01	01	0
0.8	41	40	38	37	36	35	33	32	31	29	32	31	30	29	28	26	25	25	23	22	24	22	21	20	19	19	18	17	16	14	15	14	13	12	11	10	10	09	08	07	07	06	05	04	04	03	02	02	01	0
1.0	42	40	38	37	35	33	32	31	29	27	33	32	30	29	27	25	24	23	22	20	25	23	22	20	19	18	17	16	15	13	16	14	13	12	12	11	10	09	08	07	08	07	06	05	04	03	02	02	01	0
1.2	42	40	38	36	34	32	30	29	27	25	33	32	30	28	27	25	23	22	21	19	25	23	22	20	19	17	17	16	14	12	17	15	14	13	12	11	10	09	07	06	10	08	07	06	05	04	03	02	01	0
1.4	42	39	37	35	33	31	29	27	25	23	34	32	30	28	26	24	22	21	19	18	26	24	22	20	18	17	16	15	13	12	18	16	14	13	12	11	10	09	07	06	11	09	08	07	06	04	03	02	01	0
1.6	42	39	37	35	32	30	27	25	23	22	34	33	29	27	25	23	22	20	18	17	26	24	22	20	18	17	16	15	13	11	19	17	15	14	12	11	09	08	07	06	12	10	09	07	06	05	03	02	01	0
1.8	42	39	36	34	31	29	26	24	22	21	35	33	29	27	25	23	21	19	17	16	27	25	23	20	18	17	15	14	12	10	19	17	15	14	13	11	09	08	06	05	13	11	09	08	07	05	04	03	01	0
2.0	42	39	36	34	31	28	25	23	21	19	35	33	29	26	24	22	20	18	16	14	28	25	23	20	18	16	15	13	11	09	20	18	16	14	13	11	09	08	06	05	14	12	10	09	07	05	04	03	01	0
2.2	42	39	36	33	30	27	24	22	19	18	36	32	29	26	24	22	19	17	15	13	28	25	23	20	18	16	14	12	10	09	21	19	16	14	13	11	09	07	06	05	15	13	11	09	07	06	04	03	01	0
2.4	43	39	35	33	29	27	24	21	18	17	36	32	29	26	24	22	19	16	14	12	29	26	23	20	18	16	14	12	10	08	22	19	17	15	13	11	09	07	06	05	16	13	11	09	08	06	04	03	01	0
2.6	43	39	35	32	29	26	23	20	17	15	36	32	29	25	23	21	18	16	14	12	29	26	23	20	18	16	14	11	09	08	23	20	17	15	13	11	09	07	06	04	17	14	12	10	08	06	05	03	02	0
2.8	43	39	35	32	28	25	22	19	16	14	37	33	29	25	23	21	17	15	13	11	30	27	23	20	18	15	13	11	09	07	23	20	18	16	13	11	09	07	06	03	17	15	13	10	08	07	05	03	02	0
3.0	43	39	35	31	27	24	21	18	16	13	37	33	29	25	22	20	17	15	12	10	30	27	23	20	17	15	13	11	09	07	24	21	18	16	13	11	09	07	05	03	18	16	13	11	09	07	05	03	02	0
3.2	43	39	35	31	27	23	20	71	15	13	37	33	29	25	22	19	16	14	12	10	31	27	23	20	17	15	12	11	09	06	25	21	18	16	13	11	09	07	05	03	19	16	14	11	09	07	05	03	02	0
3.4	43	39	34	30	26	23	20	17	14	12	37	33	29	25	22	19	16	14	11	09	31	27	23	20	17	15	12	10	08	06	26	22	18	16	13	11	09	07	05	03	20	17	14	12	09	07	05	03	02	0
3.6	44	39	34	30	26	22	19	16	14	11	38	33	29	24	21	18	15	13	10	09	32	27	23	20	17	15	12	10	08	05	26	22	18	16	13	11	09	06	04	03	20	17	15	12	10	08	05	04	02	0
3.8	44	38	33	29	25	22	18	16	13	10	38	33	28	24	21	18	15	13	10	08	32	28	23	20	17	15	12	10	07	05	27	23	19	17	14	11	09	06	04	02	21	18	15	12	10	08	05	04	02	0
4.0	44	38	33	29	25	21	18	15	12	10	38	33	28	24	21	.8	14	12	09	07	33	28	23	20	17	14	11	09	07	05	27	23	20	17	14	11	09	06	04	02	22	18	15	13	10	08	05	04	02	0
4.2	44	38	33	29	24	21	17	15	12	10	38	33	28	24	20	17	14	12	09	07	33	28	23	20	17	14	11	09	07	04	28	24	20	17	14	11	09	06	04	02	22	19	16	13	10	08	06	04	02	0
4.4	44	38	33	28	24	20	17	14	11	09	39	33	28	24	20	17	14	11	09	06	34	28	24	20	17	14	11	09	07	04	28	24	20	17	14	11	08	06	04	02	23	19	16	13	10	08	06	04	02	0
4.6	44	38	32	28	23	19	16	14	11	08	39	33	28	24	20	17	13	10	08	06	34	29	24	20	17	14	11	09	07	04	29	25	20	17	14	11	08	06	04	02	23	20	17	13	11	08	06	04	02	0
4.8	44	38	32	27	22	19	16	13	10	08	39	33	28	24	20	17	13	10	08	05	35	29	24	20	17	13	10	08	06	04	29	25	20	17	14	11	08	06	04	02	24	20	17	14	11	08	06	04	02	0
5.0	45	38	31	27	22	19	15	13	10	07	39	33	28	24	19	16	13	10	08	05	35	29	24	20	16	13	10	08	06	04	30	25	20	17	14	11	08	06	04	02	25	21	17	14	11	08	06	04	02	0
6.0	44	37	30	25	20	17	13	11	08	05	39	33	27	23	18	15	11	09	06	04	36	30	24	20	16	13	10	08	05	02	31	26	21	18	14	11	08	06	03	01	27	23	18	15	12	09	06	04	02	0
7.0	44	36	29	24	19	16	12	10	07	04	40	33	26	22	17	14	10	08	05	03	36	30	24	20	15	12	09	07	04	02	32	27	21	17	13	11	08	06	03	01	28	24	19	15	12	09	06	04	02	0
8.0	44	35	28	23	18	15	11	09	06	03	40	33	26	21	16	13	09	07	04	02	37	30	23	19	15	12	08	06	03	01	33	27	21	17	13	10	07	05	03	01	30	25	20	15	12	09	06	04	02	0
9.0	44	35	26	21	16	13	10	08	05	02	40	33	25	20	15	12	09	07	04	02	37	29	23	19	14	11	08	06	03	01	34	28	21	17	13	10	07	05	02	01	31	26	20	15	12	09	06	04	02	0
10.0	43	34	25	20	15	12	08	07	05	02	40	32	24	19	14	11	08	06	03	01	37	29	22	18	13	10	07	05	03	01	34	28	21	17	12	10	07	05	02	01	31	25	20	15	12	09	06	04	02	0

* Ceiling, floor or floor of cavity.

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens		ρ_{CC} →	80			70			50			30			10			0
			ρ_W →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
	Maint. Cat.	SC	RCR ↓	Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)															
1 Pendant diffusing sphere with incandescent lamp	V	1.5	0	.87	.87	.87	.81	.81	.81	.70	.70	.70	.59	.59	.59	.49	.49	.49	.45
			1	.71	.67	.63	.66	.62	.59	.56	.53	.50	.47	.45	.42	.38	.37	.35	.31
			2	.60	.54	.49	.56	.50	.45	.47	.43	.39	.39	.36	.33	.32	.29	.27	.23
			3	.52	.45	.39	.48	.42	.37	.41	.36	.31	.34	.30	.26	.27	.24	.22	.18
			4	.46	.38	.33	.42	.36	.30	.36	.30	.26	.30	.26	.22	.24	.21	.18	.15
			5	.40	.33	.27	.37	.30	.25	.31	.26	.22	.26	.22	.18	.21	.18	.15	.12
			6	.36	.28	.23	.33	.26	.21	.28	.23	.19	.23	.19	.16	.19	.15	.13	.10
			7	.32	.25	.20	.29	.23	.18	.25	.20	.16	.21	.16	.13	.17	.13	.11	.09
			8	.29	.22	.17	.26	.20	.16	.23	.17	.14	.19	.15	.12	.15	.12	.09	.07
			9	.26	.18	.15	.24	.18	.14	.20	.15	.12	.17	.13	.10	.14	.11	.08	.06
			10	.23	.17	.13	.22	.16	.12	.19	.14	.10	.16	.12	.09	.13	.09	.07	.05
2 Concentric ring unit with incandescent silvered-bowl lamp	II	N.A.	0	.83	.83	.83	.72	.72	.72	.50	.50	.50	.30	.30	.30	.12	.12	.12	.03
			1	.72	.69	.66	.62	.60	.57	.43	.42	.40	.26	.25	.25	.10	.10	.10	.03
			2	.63	.58	.54	.54	.50	.47	.38	.36	.33	.23	.22	.21	.09	.09	.08	.02
			3	.55	.49	.45	.48	.43	.39	.33	.30	.28	.20	.19	.17	.08	.08	.07	.02
			4	.48	.42	.37	.42	.37	.33	.29	.26	.24	.18	.16	.15	.07	.07	.06	.02
			5	.43	.36	.32	.37	.32	.28	.26	.23	.20	.16	.14	.13	.06	.06	.05	.01
			6	.38	.32	.27	.33	.28	.24	.23	.20	.17	.14	.12	.11	.06	.05	.04	.01
			7	.34	.28	.23	.30	.24	.21	.21	.17	.15	.13	.11	.09	.05	.04	.04	.01
			8	.31	.25	.20	.27	.21	.18	.19	.15	.13	.12	.10	.08	.05	.04	.03	.01
			9	.28	.22	.18	.24	.19	.16	.17	.14	.11	.10	.09	.07	.04	.03	.03	.01
			10	.25	.20	.16	.22	.17	.14	.16	.12	.10	.10	.08	.06	.04	.03	.03	.01
3 Porcelain-enameled ventilated standard dome with incandescent lamp	IV	1.3	0	.99	.99	.99	.97	.97	.97	.93	.93	.93	.89	.89	.89	.85	.85	.85	.83
			1	.88	.85	.82	.86	.83	.81	.83	.80	.78	.79	.78	.76	.77	.75	.73	.72
			2	.78	.73	.68	.76	.72	.67	.73	.69	.66	.71	.67	.64	.68	.65	.63	.61
			3	.69	.62	.57	.67	.61	.57	.65	.60	.56	.63	.58	.55	.61	.57	.54	.52
			4	.61	.54	.49	.60	.53	.48	.58	.52	.48	.56	.51	.47	.54	.50	.46	.45
			5	.54	.47	.41	.53	.46	.41	.51	.45	.41	.50	.44	.40	.48	.43	.40	.38
			6	.48	.41	.35	.47	.40	.35	.46	.39	.35	.44	.39	.34	.43	.38	.34	.32
			7	.43	.35	.30	.42	.35	.30	.41	.34	.30	.39	.34	.30	.38	.33	.29	.28
			8	.38	.31	.26	.38	.31	.26	.37	.30	.26	.36	.30	.26	.35	.30	.26	.24
			9	.35	.28	.23	.34	.27	.23	.33	.27	.23	.32	.27	.23	.31	.26	.22	.21
			10	.31	.25	.20	.31	.24	.20	.30	.24	.20	.29	.24	.20	.29	.23	.20	.18
4 Prismatic square surface drum	V	1.3	0	.89	.89	.89	.85	.85	.85	.77	.77	.77	.70	.70	.70	.63	.63	.63	.60
			1	.78	.75	.72	.74	.72	.69	.68	.66	.64	.62	.60	.58	.56	.55	.54	.51
			2	.69	.65	.61	.66	.62	.58	.61	.57	.54	.56	.53	.50	.51	.49	.47	.44
			3	.62	.57	.52	.60	.55	.50	.55	.51	.47	.50	.47	.44	.46	.43	.41	.39
			4	.56	.50	.46	.54	.49	.44	.50	.45	.42	.46	.42	.39	.42	.39	.37	.35
			5	.51	.45	.40	.49	.43	.39	.45	.41	.37	.42	.38	.35	.39	.36	.33	.31
			6	.46	.40	.36	.45	.39	.35	.42	.37	.33	.39	.35	.31	.36	.32	.30	.28
			7	.42	.36	.32	.41	.35	.31	.38	.33	.29	.35	.31	.28	.33	.29	.27	.25
			8	.38	.32	.28	.37	.32	.28	.35	.30	.26	.32	.28	.25	.30	.27	.24	.22
			9	.35	.29	.25	.34	.29	.25	.32	.27	.24	.30	.26	.23	.28	.24	.22	.20
			10	.32	.27	.23	.31	.26	.22	.29	.25	.21	.27	.23	.20	.26	.22	.20	.18
5 R-40 flood without shielding	IV	0.8	0	1.19	1.19	1.19	1.16	1.16	1.16	1.11	1.11	1.11	1.06	1.06	1.06	1.02	1.02	1.02	1.00
			1	1.09	1.07	1.04	1.07	1.05	1.02	1.03	1.01	.99	.99	.98	.96	.96	.95	.93	.92
			2	1.01	.97	.93	.99	.95	.92	.96	.93	.90	.93	.90	.88	.90	.88	.86	.84
			3	.93	.88	.84	.92	.87	.83	.89	.85	.81	.87	.83	.80	.84	.81	.79	.77
			4	.87	.81	.76	.85	.80	.75	.83	.78	.75	.81	.77	.74	.79	.76	.73	.71
			5	.80	.74	.69	.79	.73	.69	.77	.72	.68	.76	.71	.67	.74	.70	.67	.65
			6	.74	.68	.63	.73	.67	.63	.72	.66	.62	.70	.66	.62	.69	.65	.61	.60
			7	.69	.62	.57	.68	.62	.57	.67	.61	.57	.65	.60	.56	.64	.60	.56	.55
			8	.64	.57	.53	.63	.57	.52	.62	.56	.52	.61	.56	.52	.60	.55	.52	.50
			9	.59	.52	.48	.59	.52	.48	.58	.52	.48	.57	.51	.48	.56	.51	.47	.46
			10	.55	.49	.44	.55	.48	.44	.54	.48	.44	.53	.48	.44	.52	.47	.44	.42
6 R-40 flood with specular anodized reflector skirt; 45° cutoff	IV	0.7	0	1.01	1.01	1.01	.99	.99	.99	.94	.94	.94	.90	.90	.90	.87	.87	.87	.85
			1	.96	.94	.92	.94	.92	.91	.90	.89	.88	.87	.86	.85	.84	.84	.83	.82
			2	.91	.88	.86	.90	.87	.85	.87	.85	.83	.84	.83	.82	.82	.81	.80	.79
			3	.87	.84	.81	.86	.83	.81	.84	.81	.79	.82	.80	.78	.80	.78	.77	.76
			4	.83	.80	.77	.82	.79	.77	.81	.78	.76	.79	.77	.75	.78	.76	.74	.73
			5	.79	.76	.73	.79	.75	.73	.77	.74	.72	.76	.73	.71	.75	.73	.71	.70
			6	.76	.73	.70	.76	.72	.70	.75	.72	.69	.74	.71	.69	.73	.70	.68	.67
			7	.73	.69	.66	.73	.69	.66	.72	.68	.66	.71	.68	.66	.70	.67	.65	.64
			8	.70	.66	.63	.70	.66	.63	.69	.65	.63	.68	.65	.63	.67	.65	.63	.62
			9	.67	.63	.60	.67	.63	.60	.66	.62	.60	.65	.62	.60	.65	.62	.60	.59
			10	.64	.60	.58	.64	.60	.58	.63	.60	.58	.63	.60	.57	.62	.59	.57	.56

Gambar 4.30 CU (Sumber: Egan, 1983)

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens		ρ_{CC} →	80			70			50			30			10			0
			ρ_W →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
	Maint. Cat.	SC	RCR ↓	Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)															
7 EAR-38 lamp above 51 mm (2") diameter aperture (increase efficiency to 54 ⅛% for 76 mm (3") diameter aperture)*	IV	0.7	0	.52	.52	.52	.51	.51	.51	.48	.48	.48	.46	.46	.46	.45	.45	.45	.44
			1	.49	.48	.48	.48	.48	.47	.47	.46	.46	.45	.45	.44	.44	.43	.43	.42
			2	.47	.46	.45	.46	.45	.44	.45	.44	.43	.44	.43	.42	.43	.42	.42	.41
			3	.45	.44	.43	.45	.43	.42	.44	.42	.42	.43	.42	.41	.42	.41	.40	.40
			4	.43	.42	.41	.43	.41	.40	.42	.41	.40	.41	.40	.39	.41	.40	.39	.38
			5	.42	.40	.39	.41	.40	.38	.41	.39	.38	.40	.39	.38	.39	.38	.38	.37
			6	.40	.39	.37	.40	.38	.37	.39	.38	.37	.39	.38	.37	.38	.37	.36	.36
			7	.39	.37	.36	.39	.37	.36	.38	.37	.35	.38	.36	.35	.37	.36	.35	.35
			8	.37	.36	.34	.37	.35	.34	.37	.35	.34	.36	.35	.34	.36	.35	.34	.33
			9	.36	.34	.33	.36	.34	.33	.35	.34	.33	.35	.34	.33	.35	.33	.33	.32
			10	.35	.33	.32	.35	.33	.32	.34	.33	.32	.34	.33	.32	.34	.32	.31	.31
8 Medium distribution unit with lens plate and inside frost lamp	V	1.0	0	.65	.65	.65	.63	.63	.63	.60	.60	.60	.58	.58	.58	.55	.55	.55	.54
			1	.60	.58	.57	.58	.57	.56	.56	.55	.54	.54	.53	.52	.52	.52	.51	.50
			2	.55	.53	.51	.54	.52	.50	.52	.50	.49	.51	.49	.48	.49	.48	.47	.46
			3	.51	.48	.46	.50	.47	.45	.49	.46	.44	.47	.45	.44	.46	.44	.43	.42
			4	.47	.44	.41	.47	.44	.41	.45	.43	.41	.44	.42	.40	.43	.41	.40	.39
			5	.44	.40	.38	.43	.40	.38	.42	.39	.37	.41	.39	.37	.40	.38	.37	.36
			6	.41	.37	.35	.40	.37	.35	.39	.36	.34	.39	.36	.34	.38	.36	.34	.33
			7	.38	.34	.32	.37	.34	.32	.37	.34	.31	.36	.33	.31	.35	.33	.31	.30
			8	.35	.32	.29	.35	.31	.29	.34	.31	.29	.34	.31	.29	.33	.30	.29	.28
			9	.33	.29	.27	.32	.29	.27	.32	.29	.26	.31	.28	.26	.31	.28	.26	.25
			10	.30	.27	.25	.30	.27	.24	.30	.27	.24	.29	.26	.24	.29	.25	.24	.23
9 Recessed baffled downlight, 140 mm (5 ½") diameter aperture—150-PAR/FL lamp	IV	0.5	0	.82	.82	.82	.80	.80	.80	.76	.76	.76	.73	.73	.73	.70	.70	.70	.69
			1	.78	.77	.76	.77	.76	.75	.74	.74	.73	.72	.71	.71	.69	.69	.69	.68
			2	.76	.74	.73	.75	.73	.72	.73	.71	.70	.71	.70	.69	.69	.68	.67	.67
			3	.74	.72	.70	.73	.71	.70	.71	.70	.69	.70	.69	.68	.68	.67	.67	.66
			4	.72	.70	.68	.71	.69	.68	.70	.68	.67	.69	.67	.66	.67	.66	.66	.65
			5	.70	.68	.66	.69	.67	.66	.68	.67	.65	.67	.66	.65	.67	.65	.64	.64
			6	.69	.66	.65	.68	.66	.65	.67	.66	.64	.67	.65	.64	.66	.65	.64	.63
			7	.67	.65	.63	.67	.65	.63	.66	.64	.63	.65	.64	.63	.65	.64	.62	.62
			8	.66	.64	.62	.65	.63	.62	.65	.63	.62	.64	.63	.62	.64	.62	.61	.61
			9	.65	.63	.61	.64	.62	.61	.64	.62	.61	.63	.62	.61	.63	.62	.61	.60
			10	.63	.61	.60	.63	.61	.60	.63	.61	.60	.62	.61	.60	.62	.61	.60	.59
10 Recessed baffled downlight, 140 mm (5 ½") diameter aperture—75ER30 lamp	IV	0.5	0	1.01	1.01	1.01	.99	.99	.99	.95	.95	.95	.91	.91	.91	.87	.87	.87	.85
			1	.97	.95	.94	.95	.94	.92	.92	.91	.90	.88	.88	.87	.86	.85	.84	.83
			2	.93	.91	.89	.91	.89	.88	.89	.87	.86	.86	.85	.84	.84	.83	.82	.81
			3	.90	.87	.85	.89	.86	.84	.87	.85	.83	.85	.83	.82	.83	.82	.81	.79
			4	.87	.84	.82	.86	.83	.81	.84	.82	.80	.83	.81	.79	.81	.80	.79	.78
			5	.84	.81	.79	.83	.80	.78	.82	.79	.78	.81	.79	.77	.80	.78	.76	.75
			6	.82	.79	.76	.81	.78	.76	.80	.78	.76	.79	.77	.75	.78	.76	.75	.74
			7	.79	.76	.74	.79	.76	.74	.78	.75	.73	.77	.75	.73	.76	.74	.73	.72
			8	.77	.74	.72	.77	.74	.72	.76	.73	.71	.75	.73	.71	.75	.72	.71	.70
			9	.75	.72	.70	.75	.72	.70	.74	.71	.69	.73	.71	.69	.73	.71	.69	.68
			10	.73	.70	.68	.73	.70	.68	.72	.69	.68	.72	.69	.67	.71	.69	.67	.67
11 Wide distribution unit with lens plate and inside frost lamp	V	1.4	0	.63	.63	.63	.62	.62	.62	.59	.59	.59	.57	.57	.57	.54	.54	.54	.53
			1	.58	.56	.54	.57	.55	.54	.54	.53	.52	.52	.51	.50	.50	.50	.49	.48
			2	.53	.50	.48	.52	.49	.47	.50	.48	.46	.48	.47	.45	.47	.45	.44	.43
			3	.48	.45	.42	.47	.44	.42	.46	.43	.41	.44	.42	.40	.43	.41	.40	.39
			4	.44	.40	.37	.43	.40	.37	.42	.39	.37	.41	.38	.36	.40	.37	.36	.35
			5	.40	.36	.33	.39	.36	.33	.38	.35	.33	.37	.35	.32	.36	.34	.32	.31
			6	.36	.32	.30	.36	.32	.29	.35	.32	.29	.34	.31	.29	.33	.31	.29	.28
			7	.33	.29	.26	.33	.29	.26	.32	.28	.26	.31	.28	.26	.30	.28	.28	.25
			8	.30	.26	.23	.30	.26	.23	.29	.26	.23	.28	.25	.23	.28	.25	.23	.22
			9	.27	.23	.21	.27	.23	.21	.26	.23	.21	.26	.23	.20	.25	.22	.20	.19
			10	.25	.21	.18	.25	.21	.18	.24	.21	.18	.24	.20	.18	.23	.20	.18	.17
12 Recessed unit with dropped diffusing glass	V	1.3	0	.62	.62	.62	.60	.60	.60	.57	.57	.57	.54	.54	.54	.52	.52	.52	.51
			1	.53	.51	.48	.52	.49	.47	.49	.47	.46	.47	.45	.44	.45	.43	.42	.41
			2	.46	.42	.39	.45	.42	.39	.43	.40	.38	.41	.39	.36	.39	.37	.35	.34
			3	.40	.36	.33	.40	.35	.32	.38	.34	.31	.36	.33	.31	.35	.32	.30	.29
			4	.36	.31	.28	.35	.31	.28	.34	.30	.27	.32	.29	.26	.31	.28	.26	.25
			5	.32	.27	.24	.31	.27	.24	.30	.26	.23	.29	.25	.23	.28	.25	.22	.21
			6	.29	.24	.20	.28	.24	.20	.27	.23	.20	.26	.22	.20	.25	.22	.19	.18
			7	.26	.21	.18	.25	.21	.18	.24	.20	.17	.23	.20	.17	.22	.19	.17	.16
			8	.23	.19	.16	.23	.18	.15	.22	.18	.15	.21	.18	.15	.20	.17	.15	.14
			9	.21	.17	.14	.21	.16	.14	.20	.16	.13	.19	.16	.13	.19	.15	.13	.12
			10	.19	.15	.12	.19	.15	.12	.18	.14	.12	.18	.14	.12	.17	.14	.12	.11

* Also, reflector downlight with baffles and inside frosted lamp.

Gambar 4.31 CU (lanjutan)

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens		ρ_{CC} →	80			70			50			30			10			0
			ρ_W →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
	Maint. Cat.	SC	RCR ↓	Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)															
13	V	N.A.	0	.87	.87	.87	.85	.85	.85	.80	.80	.80	.76	.76	.76	.73	.73	.73	.71
			1	.76	.73	.70	.74	.71	.69	.71	.68	.66	.67	.65	.64	.64	.63	.61	.60
			2	.67	.62	.58	.66	.61	.57	.63	.59	.56	.60	.57	.54	.57	.55	.53	.51
			3	.59	.54	.49	.58	.53	.48	.56	.51	.47	.53	.49	.46	.51	.48	.45	.43
			4	.53	.47	.42	.52	.46	.42	.50	.45	.41	.48	.44	.40	.46	.42	.39	.38
			5	.47	.41	.36	.46	.40	.36	.44	.39	.35	.43	.38	.35	.41	.37	.34	.32
			6	.42	.36	.31	.41	.35	.31	.40	.34	.30	.38	.33	.30	.37	.33	.29	.28
			7	.37	.31	.26	.37	.31	.26	.35	.30	.26	.34	.29	.25	.33	.28	.25	.24
			8	.34	.27	.23	.33	.27	.23	.32	.26	.22	.31	.26	.22	.30	.25	.22	.20
			9	.30	.24	.20	.29	.24	.20	.28	.23	.19	.27	.23	.19	.27	.22	.19	.17
			10	.27	.21	.17	.27	.21	.17	.26	.20	.17	.25	.20	.17	.24	.19	.16	.15
Bilateral batwing distribution—clear HID with dropped prismatic lens																			
14	V	1.3	0	.78	.78	.78	.77	.77	.77	.73	.73	.73	.70	.70	.70	.67	.67	.67	.66
			1	.71	.69	.67	.70	.68	.66	.67	.66	.64	.65	.64	.62	.62	.61	.61	.59
			2	.65	.62	.59	.64	.61	.58	.62	.59	.57	.60	.58	.56	.58	.56	.55	.54
			3	.59	.55	.52	.58	.55	.52	.57	.53	.51	.55	.52	.50	.53	.51	.49	.48
			4	.54	.50	.47	.54	.49	.46	.52	.49	.46	.51	.48	.45	.49	.47	.45	.43
			5	.50	.45	.42	.49	.45	.41	.48	.44	.41	.47	.43	.41	.46	.43	.40	.39
			6	.46	.41	.37	.45	.40	.37	.44	.40	.37	.43	.39	.37	.42	.39	.36	.35
			7	.41	.37	.33	.41	.36	.33	.40	.36	.33	.39	.35	.33	.38	.35	.32	.31
			8	.38	.33	.30	.38	.33	.30	.37	.33	.30	.36	.32	.29	.35	.32	.29	.28
			9	.35	.30	.27	.34	.30	.27	.34	.29	.26	.33	.29	.26	.32	.29	.26	.25
			10	.32	.27	.24	.31	.27	.24	.31	.27	.24	.30	.26	.24	.30	.26	.23	.22
Clear HID lamp and glass refractor above plastic lens panel																			
15	V	1.4	0	.85	.85	.85	.83	.83	.83	.80	.80	.80	.76	.76	.76	.73	.73	.73	.72
			1	.78	.76	.74	.76	.74	.73	.73	.72	.70	.71	.69	.68	.68	.67	.66	.65
			2	.71	.68	.65	.70	.67	.64	.68	.65	.63	.65	.63	.61	.63	.62	.60	.59
			3	.65	.61	.57	.64	.60	.57	.62	.59	.56	.60	.57	.55	.59	.56	.54	.53
			4	.60	.55	.51	.59	.54	.51	.57	.53	.50	.55	.52	.50	.54	.51	.49	.48
			5	.54	.49	.45	.54	.49	.45	.52	.48	.45	.51	.47	.44	.50	.46	.44	.43
			6	.49	.44	.40	.49	.44	.40	.48	.43	.40	.46	.42	.40	.45	.42	.39	.38
			7	.44	.39	.35	.44	.39	.35	.43	.38	.35	.42	.38	.35	.41	.37	.35	.33
			8	.40	.35	.31	.40	.35	.31	.39	.35	.31	.38	.34	.31	.38	.34	.31	.30
			9	.37	.31	.28	.36	.31	.28	.36	.31	.28	.35	.31	.28	.34	.30	.27	.26
			10	.33	.28	.25	.33	.28	.25	.32	.28	.25	.32	.28	.25	.31	.27	.24	.23
Enclosed reflector with an incandescent lamp																			
16	III	0.7	0	.93	.93	.93	.90	.90	.90	.86	.86	.86	.82	.82	.82	.78	.78	.78	.77
			1	.87	.85	.83	.85	.83	.82	.81	.80	.79	.78	.77	.76	.75	.75	.74	.72
			2	.81	.79	.76	.80	.77	.75	.77	.75	.73	.75	.73	.72	.72	.71	.70	.69
			3	.77	.73	.71	.76	.72	.70	.73	.71	.69	.71	.69	.67	.70	.68	.66	.65
			4	.73	.69	.66	.72	.68	.65	.70	.67	.64	.68	.66	.64	.67	.65	.63	.62
			5	.69	.65	.62	.68	.64	.61	.66	.63	.61	.65	.62	.60	.64	.61	.59	.58
			6	.65	.61	.58	.64	.61	.58	.63	.60	.57	.62	.59	.57	.61	.58	.56	.55
			7	.62	.57	.54	.61	.57	.54	.60	.56	.54	.59	.56	.53	.58	.55	.53	.52
			8	.58	.54	.51	.58	.54	.51	.57	.53	.51	.56	.53	.51	.55	.52	.50	.49
			9	.55	.51	.48	.55	.51	.48	.54	.50	.48	.53	.50	.48	.53	.50	.48	.47
			10	.53	.49	.46	.52	.48	.46	.52	.48	.46	.51	.48	.45	.50	.47	.45	.44
"High bay" narrow distribution ventilated reflector with clear HID lamp																			
17	III	1.0	0	.91	.91	.91	.89	.89	.89	.85	.85	.85	.81	.81	.81	.78	.78	.78	.76
			1	.84	.82	.80	.82	.80	.78	.79	.77	.76	.76	.74	.73	.73	.72	.71	.69
			2	.77	.73	.70	.76	.72	.70	.73	.70	.68	.70	.68	.66	.68	.66	.65	.63
			3	.71	.66	.63	.69	.65	.62	.67	.64	.61	.65	.62	.60	.63	.61	.59	.57
			4	.65	.60	.58	.64	.59	.56	.62	.58	.55	.60	.57	.54	.59	.56	.54	.52
			5	.59	.54	.50	.59	.54	.50	.57	.53	.50	.56	.52	.49	.54	.51	.48	.47
			6	.54	.49	.45	.54	.49	.45	.52	.48	.45	.51	.47	.44	.50	.47	.44	.42
			7	.50	.44	.40	.49	.44	.40	.48	.43	.40	.47	.43	.39	.46	.42	.39	.38
			8	.45	.40	.36	.45	.40	.36	.44	.39	.36	.43	.39	.35	.42	.38	.35	.34
			9	.41	.36	.32	.41	.36	.32	.40	.35	.32	.39	.35	.32	.38	.35	.32	.30
			10	.38	.33	.29	.37	.32	.29	.37	.32	.29	.36	.32	.29	.35	.31	.28	.27
"High bay" intermediate distribution ventilated reflector with clear HID lamp																			
18	III	1.5	0	.93	.93	.93	.91	.91	.91	.87	.87	.87	.83	.83	.83	.79	.79	.79	.78
			1	.85	.82	.80	.83	.81	.79	.79	.78	.76	.76	.75	.74	.74	.72	.71	.70
			2	.77	.73	.70	.76	.72	.69	.73	.70	.67	.70	.68	.66	.68	.66	.64	.63
			3	.70	.65	.61	.68	.64	.60	.66	.62	.59	.64	.61	.58	.62	.59	.57	.56
			4	.63	.58	.53	.62	.57	.53	.60	.56	.52	.58	.55	.52	.57	.54	.51	.49
			5	.57	.51	.47	.56	.51	.47	.55	.50	.46	.53	.49	.46	.52	.48	.45	.44
			6	.51	.45	.41	.51	.45	.41	.49	.44	.40	.48	.43	.40	.47	.43	.40	.38
			7	.46	.40	.35	.45	.39	.35	.44	.39	.35	.43	.38	.35	.42	.38	.34	.33
			8	.41	.35	.31	.41	.35	.31	.40	.34	.31	.39	.34	.30	.38	.33	.30	.29
			9	.37	.31	.27	.37	.31	.27	.36	.30	.27	.35	.30	.27	.34	.30	.26	.25
			10	.33	.28	.24	.33	.27	.23	.32	.27	.23	.31	.27	.23	.31	.26	.23	.22
"High bay" wide distribution ventilated reflector with clear HID lamp																			

***Gambar 4.32** CU (lanjutan)*

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens		ρ_{CC} →	80			70			50			30			10			0
			ρ_W →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
	Maint. Cat.	SC	RCR ↓	Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)															
19	III	1.0	0	.96	.96	.96	.93	.93	.93	.88	.88	.88	.83	.83	.83	.78	.78	.78	.76
			1	.89	.87	.84	.86	.84	.83	.82	.80	.79	.78	.76	.75	.74	.73	.72	.70
			2	.82	.79	.76	.80	.77	.74	.76	.74	.72	.73	.71	.69	.70	.68	.67	.65
			3	.76	.72	.68	.74	.70	.67	.71	.68	.65	.68	.66	.63	.66	.63	.62	.60
			4	.70	.66	.62	.69	.65	.61	.66	.63	.60	.64	.61	.58	.62	.59	.57	.55
			5	.65	.60	.58	.64	.59	.56	.62	.58	.54	.60	.56	.53	.58	.55	.52	.51
			6	.60	.55	.51	.59	.55	.51	.57	.53	.50	.56	.52	.49	.54	.51	.48	.47
			7	.56	.50	.47	.55	.50	.46	.53	.49	.46	.52	.48	.45	.50	.47	.44	.43
			8	.52	.47	.43	.51	.46	.43	.50	.45	.42	.48	.44	.41	.47	.43	.41	.40
			9	.48	.43	.39	.47	.42	.39	.46	.42	.39	.45	.41	.38	.44	.40	.38	.36
			10	.45	.40	.36	.44	.39	.36	.43	.39	.36	.42	.38	.35	.41	.37	.35	.34
"High bay" intermediate distribution ventilated reflector with phosphor coated HID lamp																			
20	III	1.5	0	.93	.93	.93	.90	.90	.90	.83	.83	.83	.77	.77	.77	.72	.72	.72	.69
			1	.85	.83	.81	.82	.80	.78	.77	.75	.74	.72	.71	.69	.67	.66	.65	.63
			2	.78	.74	.71	.76	.72	.69	.71	.68	.66	.67	.65	.63	.63	.61	.60	.58
			3	.71	.67	.63	.69	.65	.62	.65	.62	.59	.62	.59	.57	.58	.56	.54	.53
			4	.65	.60	.56	.64	.59	.55	.60	.56	.53	.57	.54	.51	.54	.52	.50	.48
			5	.60	.54	.50	.58	.53	.49	.55	.51	.48	.53	.49	.46	.50	.47	.45	.43
			6	.54	.49	.45	.53	.48	.44	.51	.46	.43	.48	.45	.42	.46	.43	.40	.39
			7	.49	.44	.40	.48	.43	.39	.46	.41	.38	.44	.40	.37	.42	.39	.36	.34
			8	.45	.39	.35	.44	.38	.35	.42	.37	.34	.40	.36	.33	.38	.35	.32	.31
			9	.41	.35	.31	.40	.34	.31	.38	.33	.30	.36	.32	.29	.35	.31	.28	.27
			10	.37	.31	.27	.36	.31	.27	.34	.30	.26	.33	.29	.26	.32	.28	.25	.24
"High bay" wide distribution ventilated reflector with phosphor coated HID lamp																			
21	V	1.8	0	.82	.82	.82	.80	.80	.80	.76	.76	.76	.73	.73	.73	.70	.70	.70	.68
			1	.73	.71	.69	.72	.69	.67	.69	.67	.65	.66	.65	.63	.64	.63	.61	.60
			2	.66	.62	.58	.64	.61	.58	.62	.59	.56	.60	.57	.55	.58	.56	.54	.53
			3	.58	.54	.50	.57	.53	.49	.55	.52	.48	.54	.50	.48	.52	.49	.47	.45
			4	.52	.47	.43	.51	.46	.43	.50	.45	.42	.48	.45	.42	.47	.44	.41	.40
			5	.47	.41	.37	.46	.41	.37	.45	.40	.36	.43	.39	.36	.42	.38	.36	.34
			6	.42	.36	.32	.41	.36	.32	.40	.35	.31	.39	.34	.31	.38	.34	.31	.29
			7	.37	.31	.27	.36	.31	.27	.35	.30	.27	.34	.30	.26	.33	.29	.26	.25
			8	.33	.27	.23	.32	.27	.23	.31	.26	.23	.31	.26	.23	.30	.26	.23	.21
			9	.29	.24	.20	.29	.23	.20	.28	.23	.20	.27	.23	.19	.27	.22	.19	.18
			10	.26	.20	.17	.26	.20	.17	.25	.20	.17	.24	.20	.17	.24	.20	.17	.15
"Low bay" rectangular pattern, lensed bottom reflector unit with clear HID lamp																			
22	V	1.9	0	.83	.83	.83	.81	.81	.81	.77	.77	.77	.73	.73	.73	.70	.70	.70	.68
			1	.73	.70	.67	.71	.68	.66	.67	.65	.63	.64	.62	.61	.61	.60	.58	.57
			2	.64	.59	.55	.62	.58	.54	.59	.56	.52	.57	.54	.51	.54	.52	.49	.48
			3	.56	.50	.45	.54	.49	.45	.52	.47	.44	.50	.46	.43	.47	.44	.42	.40
			4	.49	.43	.38	.48	.42	.38	.46	.41	.37	.44	.40	.36	.42	.39	.36	.34
			5	.43	.37	.32	.42	.36	.32	.41	.35	.31	.39	.34	.31	.37	.33	.30	.29
			6	.38	.32	.27	.37	.31	.27	.36	.30	.26	.34	.30	.26	.33	.29	.25	.24
			7	.34	.27	.23	.33	.27	.22	.31	.26	.22	.30	.25	.22	.29	.25	.21	.20
			8	.30	.24	.19	.29	.23	.19	.28	.23	.19	.27	.22	.19	.26	.22	.18	.17
			9	.27	.21	.16	.26	.20	.16	.25	.20	.16	.24	.19	.16	.23	.19	.16	.14
			10	.24	.18	.14	.24	.18	.14	.23	.17	.14	.22	.17	.14	.21	.17	.13	.12
"Low bay" lensed bottom reflector unit with clear HID lamp																			
23	IV	1.7	0	.67	.67	.67	.65	.65	.65	.62	.62	.62	.60	.60	.60	.57	.57	.57	.56
			1	.60	.58	.57	.59	.57	.56	.57	.55	.54	.54	.53	.52	.52	.52	.51	.50
			2	.54	.51	.48	.53	.50	.48	.51	.49	.47	.49	.47	.46	.48	.46	.45	.44
			3	.48	.44	.41	.47	.44	.41	.46	.43	.40	.44	.42	.40	.43	.41	.39	.38
			4	.43	.39	.36	.42	.38	.35	.41	.38	.35	.40	.37	.34	.39	.36	.34	.33
			5	.38	.34	.30	.38	.34	.30	.37	.33	.30	.36	.32	.30	.35	.32	.29	.28
			6	.34	.30	.26	.34	.29	.26	.33	.29	.26	.32	.28	.26	.31	.28	.25	.24
			7	.30	.26	.22	.30	.25	.22	.29	.25	.22	.28	.25	.22	.27	.24	.22	.21
			8	.27	.23	.19	.27	.22	.19	.26	.22	.19	.25	.22	.19	.25	.21	.19	.18
			9	.24	.20	.17	.24	.20	.17	.23	.19	.17	.23	.19	.16	.22	.19	.16	.15
			10	.22	.17	.14	.22	.17	.14	.21	.17	.14	.21	.17	.14	.20	.17	.14	.13
Wide spread, recessed, small open bottom reflector with low wattage diffusse HID lamp																			
24	VI	N.A.	0	.74	.74	.74	.63	.63	.63	.43	.43	.43	.25	.25	.25	.08	.08	.08	.00
			1	.64	.62	.59	.55	.53	.51	.38	.36	.35	.22	.21	.20	.07	.07	.07	.00
			2	.56	.52	.48	.48	.45	.42	.33	.31	.29	.19	.18	.17	.06	.06	.06	.00
			3	.49	.44	.40	.42	.38	.35	.29	.26	.24	.17	.15	.14	.05	.05	.05	.00
			4	.43	.38	.33	.37	.33	.29	.26	.23	.20	.15	.13	.12	.05	.04	.04	.00
			5	.38	.33	.28	.33	.28	.25	.23	.20	.17	.13	.12	.10	.04	.04	.03	.00
			6	.34	.28	.24	.29	.25	.21	.20	.17	.15	.12	.10	.09	.04	.03	.03	.00
			7	.31	.25	.21	.26	.22	.18	.18	.15	.13	.11	.09	.08	.03	.03	.03	.00
			8	.28	.22	.18	.24	.19	.16	.16	.13	.11	.10	.08	.07	.03	.03	.02	.00
			9	.25	.20	.16	.21	.17	.14	.15	.12	.10	.09	.07	.06	.03	.02	.02	.00
			10	.23	.18	.14	.20	.15	.12	.14	.11	.09	.08	.06	.05	.03	.02	.02	.00
Open top, indirect, reflector type unit with HID lamp (mult. by 0.9 for lens top)																			

***Gambar 4.33** CU (lanjutan)*

MILIK
Badan Perpustakaan
dan Kearsipan

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens	ρ_{CC} →	80			70			50			30			10			0
		ρ_W →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
	Maint. Cat. / SC	RCR ↓	Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)															
25	II 1.3	0	.99	.99	.99	.94	.94	.94	.85	.85	.85	.77	.77	.77	.69	.69	.69	.65
		1	.88	.85	.82	.84	.81	.78	.76	.74	.72	.69	.67	.66	.62	.61	.60	.57
		2	.78	.73	.69	.74	.70	.66	.68	.64	.61	.62	.59	.56	.56	.54	.52	.49
		3	.70	.63	.58	.67	.61	.57	.61	.56	.53	.56	.52	.49	.51	.48	.46	.43
		4	.62	.55	.50	.60	.53	.49	.55	.50	.46	.50	.46	.43	.46	.43	.40	.37
		5	.55	.48	.43	.53	.47	.42	.49	.44	.39	.45	.41	.37	.41	.38	.35	.32
		6	.50	.43	.38	.48	.41	.37	.44	.39	.35	.41	.36	.33	.37	.34	.31	.29
		7	.45	.38	.33	.43	.37	.32	.40	.34	.30	.37	.32	.29	.34	.30	.27	.25
		8	.40	.34	.29	.39	.32	.28	.36	.30	.27	.33	.28	.25	.31	.27	.24	.22
		9	.36	.30	.25	.35	.29	.24	.32	.27	.23	.30	.25	.22	.28	.24	.21	.19
Porcelain-enameled reflector with 35°CW shielding		10	.33	.27	.22	.32	.26	.22	.29	.24	.20	.27	.23	.19	.25	.21	.18	.17
26	II 1.5/1.3	0	.95	.95	.95	.91	.91	.91	.83	.83	.83	.76	.76	.76	.69	.69	.69	.66
		1	.85	.82	.80	.82	.79	.77	.75	.73	.72	.69	.68	.66	.64	.63	.62	.59
		2	.76	.72	.68	.74	.70	.66	.68	.65	.62	.63	.61	.58	.58	.56	.55	.52
		3	.69	.63	.59	.66	.61	.57	.62	.58	.54	.57	.54	.51	.53	.51	.48	.46
		4	.62	.56	.51	.60	.54	.50	.56	.51	.47	.52	.48	.45	.48	.45	.43	.41
		5	.55	.49	.44	.53	.48	.43	.50	.45	.41	.47	.43	.39	.44	.40	.38	.36
		6	.50	.43	.39	.48	.42	.38	.45	.40	.36	.42	.38	.35	.40	.36	.33	.31
		7	.45	.38	.34	.43	.37	.33	.41	.36	.32	.38	.34	.30	.36	.32	.29	.27
		8	.40	.34	.29	.39	.33	.29	.37	.31	.28	.34	.30	.26	.32	.28	.25	.24
Diffuse aluminum reflector with 35°CW shielding		9	.36	.30	.25	.35	.29	.25	.33	.28	.24	.31	.26	.23	.29	.25	.22	.20
		10	.33	.26	.22	.32	.26	.22	.30	.25	.21	.28	.23	.20	.26	.22	.19	.18
27	II 1.0	0	.91	.91	.91	.86	.86	.86	.77	.77	.77	.68	.68	.68	.61	.61	.61	.57
		1	.81	.78	.76	.77	.74	.72	.69	.67	.66	.62	.61	.59	.56	.55	.54	.51
		2	.72	.68	.64	.69	.65	.61	.62	.59	.57	.56	.54	.52	.51	.49	.47	.45
		3	.65	.59	.55	.62	.57	.53	.56	.52	.49	.51	.48	.45	.46	.44	.42	.39
		4	.58	.52	.48	.56	.50	.46	.51	.46	.43	.46	.43	.40	.42	.39	.37	.35
		5	.52	.46	.41	.50	.44	.40	.46	.41	.37	.42	.38	.35	.38	.35	.33	.30
		6	.47	.41	.36	.45	.39	.35	.41	.37	.33	.38	.34	.31	.35	.31	.29	.27
		7	.43	.36	.32	.41	.35	.31	.38	.33	.29	.34	.30	.27	.32	.28	.26	.24
		8	.38	.32	.28	.37	.31	.27	.34	.29	.26	.31	.27	.24	.29	.25	.23	.21
Porcelain-enameled reflector with 30°CW × 30°LW shielding		9	.35	.29	.24	.33	.28	.24	.31	.26	.22	.28	.24	.21	.26	.22	.20	.18
		10	.32	.26	.22	.30	.25	.21	.28	.23	.20	.26	.22	.19	.24	.20	.18	.16
28	II 1.5/1.1	0	.83	.83	.83	.79	.79	.79	.72	.72	.72	.65	.65	.65	.59	.59	.59	.56
		1	.75	.72	.70	.72	.69	.67	.65	.64	.62	.60	.59	.58	.55	.54	.53	.50
		2	.67	.63	.60	.65	.61	.58	.59	.57	.54	.55	.53	.51	.50	.49	.47	.45
		3	.61	.56	.52	.58	.54	.51	.54	.50	.48	.50	.47	.45	.46	.44	.42	.40
		4	.55	.49	.45	.53	.48	.44	.49	.45	.42	.45	.42	.40	.42	.39	.37	.36
		5	.49	.44	.40	.47	.42	.39	.44	.40	.37	.41	.38	.35	.38	.35	.33	.31
		6	.45	.39	.35	.43	.38	.34	.40	.36	.33	.37	.34	.31	.35	.32	.30	.28
		7	.40	.35	.31	.39	.34	.30	.36	.32	.29	.34	.30	.27	.32	.29	.26	.25
		8	.36	.31	.27	.35	.30	.26	.33	.28	.25	.31	.27	.24	.29	.25	.23	.21
Diffuse aluminum reflector with 35°CW × 35°LW shielding		9	.33	.27	.23	.32	.26	.23	.29	.25	.22	.28	.24	.21	.26	.22	.20	.19
		10	.30	.24	.21	.29	.24	.20	.27	.22	.19	.25	.21	.19	.23	.20	.18	.16
29	II 1.1	0	.75	.75	.75	.69	.69	.69	.57	.57	.57	.46	.46	.46	.37	.37	.37	.32
		1	.67	.64	.62	.61	.59	.57	.51	.50	.49	.42	.41	.40	.34	.33	.32	.29
		2	.59	.55	.52	.55	.51	.49	.46	.44	.42	.38	.36	.35	.31	.30	.29	.25
		3	.53	.48	.45	.49	.45	.42	.41	.39	.36	.35	.32	.31	.28	.27	.26	.23
		4	.47	.42	.39	.44	.40	.36	.37	.34	.32	.31	.29	.27	.26	.24	.23	.20
		5	.43	.37	.33	.40	.35	.31	.34	.30	.28	.28	.26	.24	.23	.22	.20	.18
		6	.39	.33	.29	.36	.31	.28	.31	.27	.25	.26	.23	.21	.22	.20	.18	.16
		7	.35	.30	.26	.33	.28	.25	.28	.24	.22	.24	.21	.19	.20	.18	.16	.15
		8	.32	.26	.23	.30	.25	.22	.25	.22	.19	.22	.19	.17	.18	.16	.15	.13
Metal or dense diffusing sides with 45°CW × 45°LW shielding		9	.29	.24	.20	.27	.22	.19	.23	.20	.17	.20	.17	.15	.16	.15	.13	.12
		10	.26	.21	.18	.25	.20	.17	.21	.18	.15	.18	.15	.14	.15	.13	.12	.10
30	IV 1.0	0	.61	.61	.61	.58	.58	.58	.55	.55	.55	.51	.51	.51	.48	.48	.48	.46
		1	.54	.52	.51	.52	.51	.49	.49	.48	.47	.46	.45	.44	.43	.43	.42	.40
		2	.48	.46	.43	.47	.44	.42	.44	.42	.40	.42	.40	.38	.39	.38	.37	.35
		3	.44	.40	.37	.43	.39	.37	.40	.38	.35	.38	.36	.34	.36	.34	.33	.31
		4	.40	.36	.33	.39	.35	.32	.37	.34	.31	.35	.32	.30	.33	.31	.29	.28
		5	.36	.32	.29	.35	.31	.28	.33	.30	.28	.32	.29	.27	.30	.28	.26	.25
		6	.33	.29	.26	.32	.28	.25	.30	.27	.25	.29	.26	.24	.28	.25	.23	.22
		7	.30	.26	.23	.29	.25	.23	.28	.25	.22	.27	.24	.22	.25	.23	.21	.20
		8	.27	.23	.20	.27	.23	.20	.25	.22	.20	.24	.21	.19	.23	.21	.19	.18
		9	.25	.21	.18	.24	.21	.18	.23	.20	.18	.22	.19	.17	.21	.19	.17	.16
Same as unit #29 except with top reflectors		10	.23	.19	.16	.22	.19	.16	.21	.18	.16	.20	.18	.16	.20	.17	.15	.14

***Gambar 4.34** CU (lanjutan)*

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens	ρ_{CC} →	80			70			50			30			10			0
		ρ_W →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
	Maint. Cat. / SC	RCR ↓	Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)															
31	IV 1.5/1.2	0	.69	.69	.69	.67	.67	.67	.64	.64	.64	.62	.62	.62	.59	.59	.59	.58
		1	.63	.61	.59	.62	.60	.58	.59	.58	.57	.57	.56	.55	.55	.54	.53	.52
		2	.57	.54	.52	.56	.53	.51	.54	.52	.50	.52	.50	.49	.51	.49	.48	.47
		3	.52	.48	.45	.51	.47	.45	.49	.46	.44	.48	.45	.43	.48	.44	.42	.41
		4	.47	.42	.39	.46	.42	.39	.44	.41	.38	.43	.40	.38	.42	.40	.38	.36
		5	.42	.37	.34	.41	.37	.34	.40	.36	.34	.39	.36	.33	.38	.35	.33	.32
		6	.38	.33	.30	.37	.33	.30	.36	.32	.29	.35	.32	.29	.34	.31	.29	.28
		7	.34	.29	.26	.33	.29	.26	.32	.29	.26	.32	.28	.26	.31	.28	.25	.24
		8	.30	.26	.22	.30	.25	.22	.29	.25	.22	.28	.25	.22	.28	.24	.22	.21
		9	.27	.22	.19	.27	.22	.19	.26	.22	.19	.25	.22	.19	.25	.21	.19	.18
150 mm × 150 mm (6" × 6") cell parabolic wedge louver (multiply by 1.1 for 250 × 250 mm (10 × 10") cells)		10	.24	.20	.17	.24	.20	.17	.23	.19	.17	.23	.19	.17	.22	.19	.17	.16
32	I 1.3	0	1.02	1.02	1.02	.99	.99	.99	.92	.92	.92	.86	.86	.86	.81	.81	.81	.78
		1	.86	.82	.78	.83	.79	.75	.78	.74	.71	.73	.70	.67	.68	.66	.64	.61
		2	.74	.67	.61	.71	.65	.60	.66	.61	.57	.62	.58	.54	.58	.55	.52	.49
		3	.64	.56	.50	.62	.55	.49	.58	.52	.47	.54	.49	.45	.51	.47	.43	.41
		4	.56	.48	.42	.55	.47	.41	.51	.45	.39	.48	.42	.38	.45	.40	.36	.34
		5	.49	.41	.35	.48	.40	.34	.45	.38	.33	.42	.36	.32	.39	.34	.30	.28
		6	.44	.36	.30	.43	.35	.29	.40	.33	.28	.38	.32	.27	.35	.30	.26	.24
		7	.39	.31	.25	.38	.30	.25	.36	.29	.24	.34	.28	.23	.32	.27	.23	.21
		8	.35	.27	.22	.34	.27	.22	.32	.26	.21	.30	.24	.20	.29	.23	.19	.18
2 lamp, surface mounted, bare lamp unit—Photometry with 460 mm (18") wide panel above luminaire (lamps on 150 mm (6") centers)		9	.32	.24	.19	.31	.23	.18	.29	.22	.18	.27	.21	.17	.26	.20	.17	.15
		10	.29	.21	.17	.28	.21	.16	.26	.20	.16	.25	.19	.15	.23	.18	.15	.13
33	VI N.A.	0	.77	.77	.77	.68	.68	.68	.50	.50	.50	.34	.34	.34	.19	.19	.19	.12
		1	.67	.64	.62	.59	.57	.54	.44	.42	.41	.30	.29	.28	.17	.16	.16	.10
		2	.59	.54	.50	.52	.48	.45	.38	.36	.34	.26	.25	.23	.15	.14	.13	.09
		3	.51	.46	.42	.45	.41	.37	.34	.31	.28	.23	.21	.20	.13	.12	.12	.07
		4	.45	.40	.35	.40	.35	.31	.30	.27	.24	.20	.18	.17	.12	.11	.10	.06
		5	.40	.34	.30	.35	.30	.27	.26	.23	.20	.18	.16	.14	.10	.09	.08	.05
		6	.36	.30	.26	.32	.27	.23	.24	.20	.18	.16	.14	.12	.09	.08	.07	.05
		7	.32	.26	.22	.28	.23	.20	.21	.18	.15	.15	.12	.11	.08	.07	.06	.04
		8	.29	.23	.19	.25	.21	.17	.19	.16	.13	.13	.11	.09	.08	.06	.06	.03
Luminous bottom suspended unit with extra-high output lamp		9	.26	.20	.17	.23	.18	.15	.17	.14	.12	.12	.10	.08	.07	.06	.05	.03
		10	.24	.18	.15	.21	.16	.13	.16	.12	.10	.11	.09	.07	.06	.05	.04	.03
34	VI 1.4/1.2	0	.91	.91	.91	.85	.85	.85	.74	.74	.74	.64	.64	.64	.54	.54	.54	.50
		1	.80	.77	.74	.75	.73	.70	.66	.64	.62	.57	.56	.54	.49	.48	.47	.43
		2	.71	.66	.62	.67	.63	.59	.59	.56	.53	.51	.49	.47	.44	.43	.41	.38
		3	.63	.58	.53	.60	.55	.50	.53	.49	.45	.46	.43	.41	.40	.38	.36	.33
		4	.57	.50	.45	.53	.48	.43	.47	.43	.39	.41	.38	.35	.36	.34	.32	.29
		5	.50	.44	.39	.48	.42	.37	.42	.38	.34	.37	.34	.31	.33	.30	.28	.25
		6	.45	.39	.34	.43	.37	.33	.38	.33	.30	.34	.30	.27	.30	.27	.24	.22
		7	.41	.34	.30	.39	.33	.28	.34	.30	.26	.30	.27	.24	.27	.24	.21	.19
		8	.37	.30	.26	.35	.29	.25	.31	.26	.23	.27	.24	.21	.24	.21	.19	.17
Prismatic bottom and sides, open top, 4 lamp suspended unit		9	.33	.27	.22	.31	.26	.22	.28	.23	.20	.25	.21	.18	.22	.19	.16	.15
		10	.30	.24	.20	.28	.23	.19	.25	.21	.18	.23	.19	.16	.20	.17	.14	.13
35	V 1.5/1.2	0	.81	.81	.81	.78	.78	.78	.72	.72	.72	.66	.66	.66	.61	.61	.61	.59
		1	.71	.69	.66	.69	.66	.64	.64	.62	.60	.59	.58	.56	.55	.54	.53	.50
		2	.64	.59	.56	.61	.58	.54	.57	.54	.51	.53	.51	.49	.49	.48	.46	.44
		3	.57	.52	.48	.55	.50	.47	.51	.48	.45	.48	.45	.42	.45	.42	.40	.38
		4	.51	.46	.41	.49	.44	.41	.46	.42	.39	.43	.40	.37	.41	.38	.35	.34
		5	.46	.40	.36	.44	.39	.35	.41	.37	.34	.39	.35	.32	.37	.33	.31	.29
		6	.41	.35	.31	.40	.35	.31	.38	.33	.30	.35	.31	.28	.33	.30	.27	.26
		7	.37	.31	.27	.36	.31	.27	.34	.29	.26	.32	.28	.25	.30	.27	.24	.23
		8	.33	.28	.24	.32	.27	.23	.30	.26	.22	.29	.25	.22	.27	.24	.21	.19
2 lamp prismatic wraparound		9	.30	.24	.20	.29	.24	.20	.27	.23	.19	.26	.22	.19	.24	.21	.18	.17
		10	.27	.22	.18	.26	.21	.18	.25	.20	.17	.23	.19	.16	.22	.18	.16	.15
36	V 1.2	0	.82	.82	.82	.77	.77	.77	.69	.69	.69	.61	.61	.61	.53	.53	.53	.50
		1	.71	.68	.65	.67	.65	.62	.60	.58	.56	.53	.51	.50	.47	.45	.44	.41
		2	.63	.58	.54	.59	.55	.52	.53	.50	.47	.47	.45	.42	.42	.40	.38	.35
		3	.56	.50	.46	.53	.48	.44	.47	.44	.40	.42	.39	.37	.38	.35	.33	.31
		4	.50	.44	.40	.48	.42	.38	.43	.39	.35	.38	.35	.32	.34	.32	.29	.27
		5	.45	.39	.34	.43	.37	.33	.38	.34	.31	.35	.31	.28	.31	.28	.26	.24
		6	.41	.35	.30	.39	.33	.29	.35	.30	.27	.32	.28	.25	.28	.25	.23	.21
		7	.37	.31	.27	.35	.30	.26	.32	.27	.24	.29	.25	.22	.26	.23	.20	.19
		8	.33	.27	.23	.32	.26	.23	.29	.24	.21	.26	.22	.20	.23	.20	.18	.16
2 lamp prismatic wraparound		9	.30	.24	.20	.29	.23	.20	.26	.22	.19	.24	.20	.17	.21	.18	.16	.14
		10	.27	.22	.18	.26	.21	.18	.24	.19	.16	.22	.18	.15	.19	.16	.14	.13

***Gambar 4.35** CU (lanjutan)*

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens		RCR ↓	ρcc →	80			70			50			30			10			0
	Maint. Cat.	SC		ρw →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
				Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)																
37	V	1.3	0		.52	.52	.52	.50	.50	.50	.46	.46	.46	.43	.43	.43	.39	.39	.39	.38
			1		.45	.43	.41	.43	.41	.39	.40	.38	.37	.36	.35	.34	.34	.33	.32	.30
			2		.39	.35	.33	.37	.34	.32	.34	.32	.30	.32	.30	.28	.29	.28	.26	.25
			3		.34	.30	.27	.33	.29	.26	.30	.27	.25	.28	.26	.24	.26	.24	.22	.21
			4		.30	.26	.23	.29	.25	.22	.27	.24	.21	.25	.22	.20	.23	.21	.19	.18
			5		.26	.22	.19	.25	.21	.19	.23	.20	.18	.22	.19	.17	.20	.18	.16	.15
			6		.23	.19	.16	.23	.19	.16	.21	.18	.15	.19	.17	.14	.18	.16	.14	.13
			7		.21	.17	.14	.20	.16	.14	.19	.16	.13	.18	.15	.13	.16	.14	.12	.11
			8		.19	.15	.12	.18	.14	.12	.17	.14	.11	.16	.13	.11	.15	.12	.10	.09
			9		.17	.13	.10	.16	.13	.10	.15	.12	.10	.14	.11	.09	.13	.11	.09	.08
			10		.15	.12	.09	.15	.11	.09	.14	.11	.09	.13	.10	.08	.12	.10	.08	.07
38	IV	1.0	0		.60	.60	.60	.58	.58	.58	.56	.56	.56	.53	.53	.53	.51	.51	.51	.50
			1		.54	.52	.50	.52	.51	.49	.50	.49	.48	.48	.47	.46	.47	.46	.45	.44
			2		.48	.45	.43	.47	.44	.42	.45	.43	.41	.44	.42	.40	.42	.41	.39	.39
			3		.43	.40	.37	.42	.39	.37	.41	.38	.36	.40	.37	.36	.39	.37	.35	.34
			4		.39	.35	.32	.38	.35	.32	.37	.34	.32	.36	.33	.31	.35	.33	.31	.30
			5		.35	.31	.28	.35	.31	.28	.34	.30	.28	.33	.30	.28	.32	.29	.27	.26
			6		.32	.28	.25	.32	.28	.25	.31	.27	.25	.30	.27	.25	.29	.26	.24	.23
			7		.29	.25	.22	.29	.25	.22	.28	.25	.22	.27	.24	.22	.27	.24	.22	.21
			8		.26	.22	.20	.26	.22	.20	.25	.22	.20	.25	.22	.19	.24	.21	.19	.18
			9		.24	.20	.17	.24	.20	.17	.23	.20	.17	.23	.19	.17	.22	.19	.17	.16
			10		.22	.18	.16	.22	.18	.16	.21	.18	.16	.21	.18	.15	.20	.17	.15	.15
39	IV	0.9	0		.55	.55	.55	.54	.54	.54	.51	.51	.51	.49	.49	.49	.47	.47	.47	.46
			1		.50	.48	.47	.49	.47	.46	.47	.46	.45	.45	.44	.43	.43	.43	.42	.41
			2		.45	.43	.41	.44	.42	.40	.43	.41	.39	.41	.40	.38	.40	.39	.37	.37
			3		.41	.38	.36	.40	.38	.35	.39	.37	.35	.38	.36	.34	.37	.35	.34	.33
			4		.37	.34	.32	.37	.34	.31	.36	.33	.31	.35	.32	.31	.34	.32	.30	.29
			5		.34	.30	.28	.33	.30	.28	.32	.30	.27	.32	.29	.27	.31	.29	.27	.26
			6		.31	.28	.25	.31	.27	.25	.30	.27	.25	.29	.27	.25	.29	.26	.24	.24
			7		.29	.25	.23	.28	.25	.23	.28	.25	.22	.27	.24	.22	.26	.24	.22	.21
			8		.26	.23	.20	.26	.23	.20	.25	.22	.20	.25	.22	.20	.24	.22	.20	.19
			9		.24	.20	.18	.24	.20	.18	.23	.20	.18	.23	.20	.18	.22	.20	.18	.17
			10		.22	.19	.16	.22	.19	.16	.21	.18	.16	.21	.18	.16	.20	.18	.16	.15
40	V	1.2	0		.73	.73	.73	.71	.71	.71	.68	.68	.68	.65	.65	.65	.62	.62	.62	.60
			1		.64	.61	.59	.62	.60	.58	.60	.58	.56	.57	.56	.54	.55	.54	.52	.51
			2		.56	.52	.49	.55	.51	.48	.52	.49	.47	.50	.48	.46	.48	.46	.44	.43
			3		.50	.45	.41	.49	.44	.41	.47	.43	.40	.45	.42	.39	.43	.41	.38	.37
			4		.44	.39	.35	.43	.38	.35	.42	.37	.34	.40	.36	.33	.39	.36	.33	.32
			5		.39	.34	.30	.38	.33	.29	.37	.32	.29	.36	.32	.29	.34	.31	.28	.27
			6		.35	.30	.26	.34	.29	.25	.33	.29	.25	.32	.28	.25	.31	.27	.25	.23
			7		.31	.26	.22	.31	.26	.22	.30	.25	.22	.29	.25	.22	.28	.24	.22	.20
			8		.28	.23	.19	.28	.23	.19	.27	.22	.19	.26	.22	.19	.25	.22	.19	.18
			9		.25	.20	.17	.25	.20	.17	.24	.20	.17	.23	.19	.16	.23	.19	.16	.15
			10		.23	.18	.15	.23	.18	.15	.22	.18	.15	.21	.17	.15	.21	.17	.14	.13
41	V	1.2	0		.69	.69	.69	.67	.67	.67	.64	.64	.64	.61	.61	.61	.59	.59	.59	.58
			1		.61	.58	.56	.59	.57	.56	.57	.55	.54	.55	.53	.52	.53	.52	.51	.49
			2		.53	.50	.47	.52	.49	.46	.50	.48	.45	.49	.46	.44	.47	.45	.43	.42
			3		.47	.43	.40	.47	.42	.39	.45	.41	.38	.43	.40	.38	.42	.39	.37	.36
			4		.42	.37	.34	.41	.37	.33	.40	.36	.33	.39	.35	.33	.37	.35	.32	.31
			5		.37	.32	.29	.37	.32	.28	.35	.31	.28	.34	.31	.28	.33	.30	.27	.26
			6		.33	.28	.25	.33	.28	.25	.32	.28	.24	.31	.27	.24	.30	.27	.24	.23
			7		.30	.25	.22	.30	.25	.21	.29	.24	.21	.28	.24	.21	.27	.24	.21	.20
			8		.27	.22	.19	.27	.22	.19	.26	.22	.18	.25	.21	.18	.24	.21	.18	.17
			9		.24	.19	.16	.24	.19	.16	.23	.19	.16	.23	.19	.16	.22	.18	.16	.15
			10		.22	.17	.14	.22	.17	.14	.21	.17	.14	.21	.17	.14	.20	.17	.14	.13
42	V	1.4/1.2	0		.75	.75	.75	.72	.73	.73	.70	.70	.70	.67	.67	.67	.64	.64	.64	.63
			1		.67	.65	.63	.66	.64	.62	.63	.62	.60	.61	.60	.58	.59	.58	.57	.55
			2		.60	.57	.54	.59	.56	.53	.57	.54	.52	.55	.53	.51	.53	.51	.50	.49
			3		.54	.50	.47	.53	.49	.46	.52	.48	.45	.50	.47	.45	.48	.46	.44	.43
			4		.49	.44	.40	.48	.44	.40	.47	.43	.40	.45	.42	.39	.44	.41	.39	.37
			5		.44	.39	.35	.43	.38	.35	.42	.38	.34	.41	.37	.34	.40	.36	.34	.33
			6		.40	.34	.31	.39	.34	.31	.38	.31	.30	.37	.33	.30	.36	.32	.30	.29
			7		.36	.30	.27	.35	.30	.27	.34	.30	.27	.33	.29	.26	.32	.29	.26	.25
			8		.32	.27	.23	.32	.27	.23	.31	.26	.23	.30	.26	.23	.29	.26	.23	.22
			9		.29	.24	.20	.28	.23	.20	.28	.23	.20	.27	.23	.20	.26	.23	.20	.19
			10		.26	.21	.18	.26	.21	.18	.25	.21	.18	.24	.20	.18	.24	.20	.18	.16

2 lamp diffuse wraparound

4 lamp, 610 mm (2') wide troffer with 45° plastic louver

4 lamp, 610 mm (2') wide troffer with 45° white metal louver

Fluorescent unit dropped diffuser, 4 lamp 610 mm (2') wide

Fluorescent unit with flat bottom diffuser, 4 lamp 610 mm (2') wide

Fluorescent unit with flat prismatic lens, 4 lamp 610 mm (2') wide

***Gambar 4.36** CU (lanjutan)*

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens		RCR ↓	ρcc →	80			70			50			30			10			0
	Maint. Cat.	SC		ρw →	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
				Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{FC} = 20)																
43	V	1.4/1.3	0		.78	.78	.78	.76	.76	.76	.73	.73	.73	.70	.70	.70	.67	.67	.67	.66
			1		.71	.69	.67	.70	.68	.66	.67	.65	.64	.64	.63	.62	.62	.61	.60	.59
			2		.64	.61	.58	.63	.60	.58	.61	.59	.56	.59	.57	.55	.57	.55	.54	.53
			3		.58	.54	.51	.58	.54	.51	.56	.52	.50	.54	.51	.49	.52	.50	.48	.47
			4		.53	.48	.45	.52	.48	.44	.51	.47	.44	.49	.46	.43	.48	.45	.43	.42
			5		.48	.43	.39	.47	.42	.39	.46	.42	.39	.45	.41	.38	.43	.40	.38	.37
			6		.43	.38	.35	.43	.38	.34	.42	.37	.34	.40	.37	.34	.40	.36	.34	.32
			7		.39	.34	.30	.38	.34	.30	.38	.33	.30	.37	.33	.30	.36	.32	.30	.28
			8		.35	.30	.26	.35	.30	.26	.34	.29	.26	.33	.29	.26	.32	.29	.26	.25
			9		.31	.26	.23	.31	.26	.23	.30	.26	.23	.29	.25	.23	.29	.25	.23	.21
			10		.28	.24	.20	.28	.23	.20	.28	.23	.20	.27	.23	.20	.26	.23	.20	.19
44	IV	N.A.	0		.71	.71	.71	.70	.70	.70	.66	.66	.66	.64	.64	.64	.61	.61	.61	.60
			1		.65	.63	.61	.63	.62	.60	.61	.59	.58	.59	.57	.56	.57	.56	.55	.54
			2		.59	.55	.53	.58	.55	.52	.55	.53	.51	.54	.52	.50	.52	.50	.49	.48
			3		.53	.49	.46	.52	.48	.45	.50	.47	.45	.49	.46	.44	.47	.45	.43	.42
			4		.47	.43	.40	.47	.43	.40	.45	.42	.39	.44	.41	.39	.43	.40	.38	.37
			5		.42	.38	.34	.42	.37	.34	.41	.37	.34	.40	.36	.34	.39	.36	.33	.32
			6		.38	.33	.30	.38	.33	.30	.37	.33	.30	.36	.32	.29	.35	.32	.29	.28
			7		.34	.29	.26	.33	.29	.26	.33	.28	.25	.32	.28	.25	.31	.28	.25	.24
			8		.30	.25	.22	.30	.25	.22	.29	.25	.22	.28	.24	.22	.27	.24	.21	.20
			9		.27	.22	.18	.26	.22	.18	.26	.21	.18	.25	.21	.18	.24	.21	.18	.17
			10		.24	.19	.16	.24	.19	.16	.23	.19	.16	.22	.19	.16	.22	.18	.16	.15
45	V	N.A.	0		.57	.57	.57	.56	.56	.56	.53	.53	.53	.51	.51	.51	.49	.49	.49	.48
			1		.50	.48	.47	.49	.47	.46	.47	.46	.44	.45	.44	.43	.44	.43	.42	.41
			2		.44	.41	.38	.43	.40	.38	.41	.39	.37	.40	.38	.36	.38	.37	.35	.34
			3		.39	.35	.32	.38	.34	.31	.37	.33	.31	.35	.33	.30	.34	.32	.30	.29
			4		.34	.30	.27	.33	.29	.26	.32	.29	.26	.31	.28	.26	.30	.27	.25	.24
			5		.30	.25	.22	.29	.25	.22	.28	.24	.22	.27	.24	.21	.26	.23	.21	.20
			6		.26	.22	.19	.26	.22	.18	.25	.21	.18	.24	.21	.18	.23	.20	.18	.17
			7		.23	.19	.16	.23	.19	.16	.22	.18	.16	.21	.18	.15	.21	.18	.15	.14
			8		.21	.16	.13	.20	.16	.13	.19	.16	.13	.19	.15	.13	.18	.15	.13	.12
			9		.18	.14	.11	.18	.14	.11	.17	.14	.11	.17	.13	.11	.16	.13	.11	.10
			10		.16	.12	.09	.16	.12	.09	.16	.12	.09	.16	.12	.09	.15	.12	.09	.08
46	V	N.A.	0		.87	.87	.87	.84	.84	.84	.77	.77	.77	.72	.72	.72	.66	.66	.66	.64
			1		.76	.73	.70	.73	.70	.67	.67	.65	.63	.63	.61	.59	.58	.57	.55	.53
			2		.66	.61	.57	.64	.59	.56	.59	.56	.52	.55	.52	.49	.51	.49	.47	.44
			3		.59	.53	.48	.56	.51	.47	.53	.48	.44	.49	.45	.42	.46	.43	.40	.38
			4		.52	.45	.40	.50	.44	.40	.47	.42	.38	.44	.39	.36	.41	.37	.34	.32
			5		.46	.39	.34	.44	.38	.33	.41	.36	.32	.38	.34	.31	.36	.32	.29	.27
			6		.41	.34	.29	.39	.33	.29	.37	.31	.27	.34	.30	.26	.32	.28	.25	.23
			7		.36	.30	.25	.35	.29	.24	.33	.27	.23	.31	.26	.23	.29	.25	.22	.20
			8		.32	.26	.21	.31	.25	.21	.29	.24	.20	.27	.23	.19	.26	.21	.18	.17
			9		.29	.22	.18	.28	.22	.18	.26	.21	.17	.24	.20	.18	.23	.19	.15	.14
			10		.26	.20	.16	.25	.19	.15	.23	.18	.15	.22	.17	.14	.20	.16	.13	.12
47	V	1.7	0		.71	.71	.71	.69	.69	.69	.66	.66	.66	.63	.63	.63	.61	.61	.61	.60
			1		.62	.60	.58	.61	.59	.57	.59	.57	.55	.56	.55	.53	.54	.53	.52	.51
			2		.55	.51	.47	.53	.50	.47	.51	.48	.46	.49	.47	.45	.48	.45	.44	.42
			3		.48	.43	.39	.47	.43	.39	.45	.41	.38	.44	.40	.38	.42	.39	.37	.36
			4		.42	.37	.33	.41	.37	.33	.40	.36	.32	.39	.35	.32	.37	.34	.31	.30
			5		.37	.32	.27	.36	.31	.27	.35	.30	.27	.34	.30	.27	.33	.29	.26	.25
			6		.33	.27	.23	.32	.27	.23	.31	.26	.23	.30	.26	.23	.29	.25	.23	.21
			7		.29	.24	.20	.29	.24	.20	.28	.23	.20	.27	.23	.20	.26	.22	.19	.18
			8		.26	.21	.17	.25	.20	.17	.25	.20	.17	.24	.20	.17	.23	.19	.16	.15
			9		.23	.18	.14	.23	.18	.14	.22	.17	.14	.21	.17	.14	.21	.17	.14	.13
			10		.21	.16	.12	.20	.16	.12	.20	.15	.12	.19	.15	.12	.19	.15	.12	.11
48	I	1.6/1.2	0		1.01	1.01	1.01	.96	.96	.96	.87	.87	.87	.79	.79	.79	.72	.72	.72	.68
			1		.85	.81	.77	.81	.77	.73	.73	.70	.67	.66	.64	.62	.60	.58	.56	.53
			2		.73	.66	.61	.69	.63	.58	.63	.58	.54	.57	.53	.50	.51	.48	.45	.42
			3		.63	.56	.50	.60	.53	.48	.55	.49	.44	.50	.45	.41	.45	.41	.38	.35
			4		.56	.47	.41	.53	.46	.40	.48	.42	.37	.44	.39	.34	.40	.35	.32	.29
			5		.49	.40	.34	.46	.39	.33	.42	.36	.31	.38	.33	.29	.35	.30	.26	.24
			6		.43	.35	.29	.41	.34	.28	.38	.31	.26	.34	.29	.24	.31	.26	.23	.20
			7		.39	.31	.25	.37	.29	.24	.34	.27	.23	.31	.25	.21	.28	.23	.19	.17
			8		.34	.27	.21	.33	.26	.21	.30	.24	.19	.27	.22	.18	.25	.20	.17	.15
			9		.31	.23	.18	.30	.23	.18	.27	.21	.17	.25	.19	.15	.22	.18	.14	.12
			10		.28	.21	.16	.27	.20	.16	.25	.19	.15	.22	.17	.14	.20	.16	.13	.11

4 lamp, 610 mm (2') wide unit with sharp cutoff (high angle—low luminance) flat prismatic lens

Bilateral batwing distribution—louvered fluorescent unit

Bilateral batwing distribution—4 lamp, 610 mm (2') wide fluorescent unit with flat prismatic lens and overlay

Bilateral batwing distribution—one lamp, surface mounted fluorescent with prismatic wraparound lens

Radial batwing distribution—4 lamp, 610 mm (2') wide fluorescent unit with flat prismatic lens

2 lamp fluorescent strip unit

***Gambar 4.37** CU (lanjutan)*

Typical Luminaire	Typical Intensity Distribution and Per Cent Lamp Lumens		RCR ↓	Coefficients of Utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (ρ_{fc} = 20)													
	Maint. Cat.	SC															
48	I	1.4/1.2	0	1.13	1.13	1.13	1.09	1.09	1.09	1.01	1.01	1.01	.94	.94	.94	.88	.88	.88	.85
			1	.96	.92	.88	.93	.89	.85	.87	.83	.80	.81	.78	.75	.75	.73	.71	.68
			2	.83	.76	.70	.80	.74	.68	.75	.69	.65	.70	.65	.61	.65	.61	.58	.55
			3	.73	.65	.58	.70	.63	.57	.66	.59	.54	.61	.56	.52	.57	.53	.49	.46
			4	.64	.55	.49	.62	.54	.48	.58	.51	.46	.54	.48	.44	.51	.46	.42	.39
			5	.56	.47	.41	.55	.46	.40	.51	.44	.38	.48	.42	.37	.45	.39	.35	.33
			6	.50	.41	.35	.49	.40	.34	.46	.38	.33	.43	.36	.32	.40	.35	.30	.28
			7	.45	.36	.30	.44	.35	.30	.41	.34	.28	.38	.32	.27	.36	.31	.26	.24
			8	.40	.32	.26	.39	.31	.25	.37	.30	.25	.35	.28	.24	.33	.27	.23	.21
			9	.36	.28	.22	.35	.27	.22	.33	.26	.21	.31	.25	.20	.29	.24	.20	.18
			10	.33	.25	.20	.32	.24	.19	.30	.23	.19	.28	.22	.18	.27	.21	.17	.15

2 lamp fluorescent strip unit with 235° reflector fluorescent lamps

Typical Luminaires		RCR ↓	Coefficients of utilization for 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance, ρ_{FC}															
50		1	.42	.40	.39	.36	.35	.33	.25	.24	.23	Coves are not recommended for lighting areas having low reflectances.						
		2	.37	.34	.32	.32	.29	.27	.22	.20	.19							
		3	.32	.29	.26	.28	.25	.23	.19	.17	.16							
		4	.29	.25	.22	.25	.22	.19	.17	.15	.13							
		5	.25	.21	.18	.22	.19	.16	.15	.13	.11							
		6	.23	.19	.16	.20	.16	.14	.14	.12	.10							
		7	.20	.17	.14	.17	.14	.12	.12	.10	.09							
		8	.18	.15	.12	.16	.13	.10	.11	.09	.08							
		9	.17	.13	.10	.15	.11	.09	.10	.08	.07							
Single row fluorescent lamp cove without reflector, mult. by 0.93 for 2 rows and by 0.85 for 3 rows.		10	.15	.12	.09	.13	.10	.08	.09	.07	.06							
51		1				.60	.56	.56	.58	.56	.54							
		2				.53	.49	.46	.51	.47	.43							
		3				.47	.42	.37	.45	.41	.36							
		4				.41	.36	.32	.39	.35	.31							
		5				.37	.31	.27	.35	.30	.26							
		6				.33	.27	.23	.31	.26	.23							
		7				.29	.24	.20	.28	.23	.20							
		8				.26	.21	.18	.25	.20	.17							
		9				.23	.19	.15	.22	.15	.15							
		10				.21	.17	.13	.21	.16	.13							
52		1				.71	.68	.66	.67	.66	.65	.65	.64	.62				
		2				.63	.60	.57	.61	.58	.55	.59	.56	.54				
		3				.57	.53	.49	.55	.52	.48	.54	.50	.47				
		4				.52	.47	.43	.50	.45	.42	.48	.44	.42				
		5				.46	.41	.37	.44	.40	.37	.43	.40	.36				
		6				.42	.37	.33	.41	.36	.32	.40	.35	.32				
		7				.38	.32	.29	.37	.31	.28	.36	.31	.28				
		8				.34	.28	.25	.33	.28	.25	.32	.28	.25				
		9				.30	.25	.22	.30	.25	.21	.29	.25	.21				
		10				.27	.23	.19	.27	.22	.19	.26	.22	.19				
53		1							.51	.49	.48				.47	.46	.45	
		2							.46	.44	.42				.43	.42	.40	
		3							.42	.39	.37				.39	.38	.36	
		4							.38	.35	.33				.36	.34	.32	
		5							.35	.32	.29				.33	.31	.29	
		6							.32	.29	.26				.30	.28	.26	
		7							.29	.26	.23				.28	.25	.23	
		8							.27	.23	.21				.26	.23	.21	
		9							.24	.21	.19				.24	.21	.19	
		10							.22	.19	.17				.22	.19	.17	

Louvered ceiling.
Ceiling efficiency ~50%; 45° shielding opaque louvers of 80% reflectance. Cavity with minimum obstructions and painted with 80% reflectance paint—use ρ_c = 50.

Diffusing plastic or glass
1) Ceiling efficiency ~60%; diffuser transmittance ~50%; diffuser reflectance ~40%. Cavity with minimum obstructions and painted with 80% reflectance paint—use ρ_c = 70.
2) For lower reflectance paint or obstructions—use ρ_c = 50.

Prismatic plastic or glass.
1) Ceiling efficiency ~67%; prismatic transmittance ~72%; prismatic reflectance ~18%. Cavity with minimum obstructions and painted with 80% reflectance paint—use ρ_c = 70.
2) For lower reflectance paint or obstructions—use ρ_c = 50.

Note: Spacing criterion (SC) procedures to determine maximum spacings at which horizontal illuminance will be reasonably uniform between luminaires are given on pages 9-34 to 9-36, *IES Lighting Handbook* (1981 Reference Volume). Maintenance categories (from Maint. Cat. I to VI) are used to determine LDD values according to graphs on page 9-5 of the handbook.

Gambar 4.38 *CU (lanjutan)*

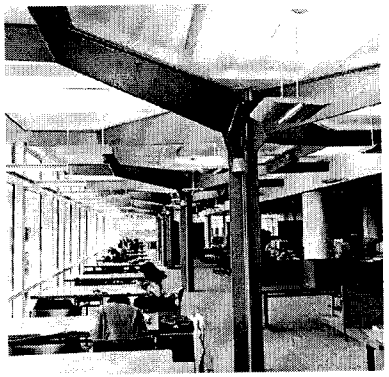
Tabel 4.9 *Pengali bila effective floor cavity reflectance bukan 20%.*

Multiplying Factors for Other than 20 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance

% Effective Ceiling Cavity Reflectance, ρ_{CC}	80				70				50			30			10		
% Wall Reflectance, ρ_w	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10
For 30 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (20 Per Cent = 1.00)																	
Room Cavity Ratio																	
1	1.092	1.082	1.075	1.068	1.077	1.070	1.064	1.059	1.049	1.044	1.040	1.028	1.026	1.023	1.012	1.010	1.008
2	1.079	1.068	1.055	1.047	1.068	1.057	1.048	1.039	1.041	1.033	1.027	1.026	1.021	1.017	1.013	1.010	1.006
3	1.070	1.054	1.042	1.033	1.061	1.048	1.037	1.028	1.034	1.027	1.020	1.024	1.017	1.012	1.014	1.009	1.005
4	1.062	1.045	1.033	1.024	1.055	1.040	1.029	1.021	1.030	1.022	1.015	1.022	1.015	1.010	1.014	1.009	1.004
5	1.056	1.038	1.026	1.018	1.050	1.034	1.024	1.015	1.027	1.018	1.012	1.020	1.013	1.008	1.014	1.009	1.004
6	1.052	1.033	1.021	1.014	1.047	1.030	1.020	1.012	1.024	1.015	1.009	1.019	1.012	1.006	1.014	1.008	1.003
7	1.047	1.029	1.018	1.011	1.043	1.026	1.017	1.009	1.022	1.013	1.007	1.018	1.010	1.005	1.014	1.008	1.003
8	1.044	1.026	1.015	1.009	1.040	1.024	1.015	1.007	1.020	1.012	1.006	1.017	1.009	1.004	1.013	1.007	1.003
9	1.040	1.024	1.014	1.007	1.037	1.022	1.014	1.006	1.019	1.011	1.005	1.016	1.009	1.004	1.013	1.007	1.002
10	1.037	1.022	1.012	1.006	1.034	1.020	1.012	1.005	1.017	1.010	1.004	1.015	1.009	1.003	1.013	1.007	1.002
For 10 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (20 Per Cent = 1.00)																	
Room Cavity Ratio																	
1	.923	.929	.935	.940	.933	.939	.943	.948	.956	.960	.963	.973	.976	.979	.989	.991	.993
2	.931	.942	.950	.958	.940	.949	.957	.963	.962	.968	.974	.978	.980	.985	.988	.991	.995
3	.939	.951	.961	.969	.945	.957	.966	.973	.967	.975	.981	.978	.983	.988	.988	.992	.996
4	.944	.958	.969	.978	.950	.963	.973	.980	.972	.980	.986	.980	.986	.991	.987	.992	.996
5	.949	.964	.976	.983	.954	.968	.978	.985	.975	.983	.989	.981	.988	.993	.987	.992	.997
6	.953	.969	.980	.986	.958	.972	.982	.989	.977	.985	.992	.982	.989	.995	.987	.993	.997
7	.957	.973	.983	.991	.961	.975	.985	.991	.979	.987	.994	.983	.990	.996	.987	.993	.998
8	.960	.976	.986	.993	.963	.977	.987	.993	.981	.988	.995	.984	.991	.997	.987	.994	.998
9	.963	.978	.987	.994	.965	.979	.989	.994	.983	.990	.996	.985	.992	.998	.988	.994	.999
10	.965	.980	.989	.995	.967	.981	.990	.995	.984	.991	.997	.986	.993	.998	.988	.994	.999
For 0 Per Cent Effective Floor Cavity Reflectance (20 Per Cent = 1.00)																	
Room Cavity Ratio																	
1	.859	.870	.879	.886	.873	.884	.893	.901	.916	.923	.929	.948	.954	.960	.979	.983	.987
2	.871	.887	.903	.919	.886	.902	.916	.928	.926	.938	.949	.954	.963	.971	.978	.983	.991
3	.882	.904	.915	.942	.898	.918	.934	.947	.936	.950	.964	.958	.969	.979	.976	.984	.993
4	.893	.919	.941	.958	.906	.930	.948	.961	.945	.961	.974	.961	.974	.984	.975	.985	.994
5	.903	.931	.953	.969	.914	.939	.958	.970	.951	.967	.980	.964	.977	.988	.975	.985	.995
6	.911	.940	.961	.976	.920	.945	.965	.977	.955	.972	.985	.966	.979	.991	.975	.986	.996
7	.917	.947	.967	.981	.924	.950	.970	.982	.959	.975	.988	.968	.981	.993	.975	.987	.997
8	.922	.953	.971	.985	.929	.955	.975	.986	.963	.978	.991	.970	.983	.995	.976	.988	.998
9	.926	.958	.975	.988	.933	.959	.980	.989	.966	.980	.993	.971	.985	.996	.976	.988	.998
10	.933	.962	.979	.991	.937	.963	.983	.992	.969	.982	.995	.973	.987	.997	.977	.989	.999

4.6 Galeri

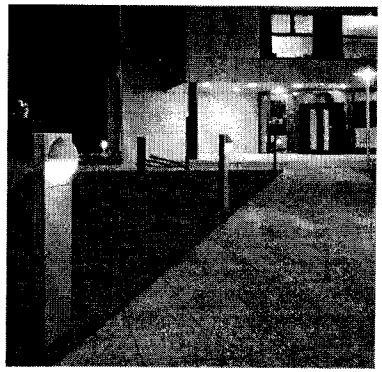
Gambar 4.39 *Contoh pencahayaan ruang kantor (http://www.thornlight.com.au/)*



Gambar 4.40 *Contoh penggabungan pencahayaan buatan dan alami untuk ruang baca (http://www.thornlight.com.au/)*

Gambar 4.41 *Pencahayaan ruang olah raga (http://www.thornlight.com.au/)*

Gambar 4.42 *Pencahayaan baur pada lorong (http://www.thornlight.com.au/)*



Gambar 4.43 *Penerangan pedestrian untuk mengantar ke bangunan (http://www.thornlight.com.au/)*

Gambar 4.44 *Pencahayaan ruang luar (http://www.thornlight.com.au/)*

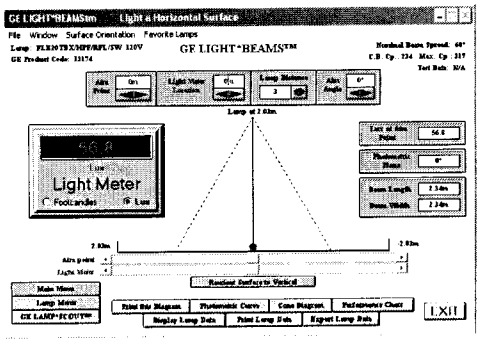
4.7 Alamat Internet

http://bulbmuseum.net/; museum lampu.
www.cibse.org; The Chartered Institution Of Building Services Engineers, memberikan hasil-hasil panelitian terbaru dalam bidang pencahayaan.
http://www.iald.org/index.htm; International Association of Lighting Designers, memberikan informasi profesional dan komersial dalam industri pencahayaan.

http://www.iesna.org; Illuminating Engineering Society Of North America, menyediakan berbagai macam perkembangan baru dalam pencahayaan buatan.
http://www.lightsearch.com/; informasi mengenai dunia lampu, pengetahuan tentang lampu, dan *software*.
http://www.lightsearch.com/resources/lightguides/design.html; dasar-dasar perancangan pencahayaan.
http://members.shaw.ca/bkeith2/LXPrograms.htm; menyediakan informasi mengenai *software* untuk pencahayaan. Banyak di antaranya memberi versi demo yang bagus untuk belajar memahami *lighting design*!
http://www.gelighting.com/na/institute/glossary.html; istilah-istilah dalam pencahayaan buatan.
http://www.lrc.rpi.edu/; Lighting Research Centre, bagian dari Rensselaer Polytechnic Institute yang didedikasikan untuk memelajari masalah pencahayaan.
http://www.rpi.edu/dept/lrc/lightinglit.html ; menyediakan alamat jurnal, majalah, dan media lain yang berhubungan dengan pencahayaan, termasuk warna, mata, dan sebagainya.

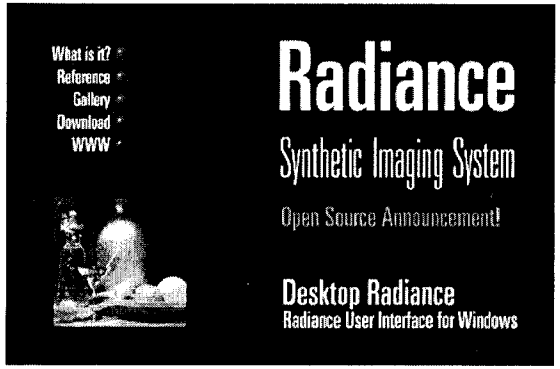
4.8 Software

Perangkat lunak (*software*) yang dapat membantu perancangan pencahayaan buatan cukup banyak tersedia. Namun umumnya harga komersialnya cukup tinggi untuk ukuran kantong kebanyakan orang Indonesia. Untuk menghindari pembajakan karya intelektual, kita dapat mencari perangkat lunak yang ditawarkan secara cuma-cuma di internet. Carilah dengan beberapa kata kunci seperti: "lighting software free".



Gambar 4.45 *Light*Beams*
(http://www.gelighting.com/na/specocem/lightbeams.html)

Gambar 4.46 *MicroLux*
(http://www.luxart.com/)



Gambar 4.47 *Radiance*
(http://radsite.lbl.gov/radiance/framed.html)

BAB 5
AKUSTIK ALAMI

Penataan bunyi pada bangunan mempunyai dua tujuan, yaitu untuk kesehatan (mutlak) dan untuk kenikmatan (diusahakan). Penataan bunyi melibatkan empat elemen yang harus dipahami oleh para arsitek, yaitu sumber bunyi (*sound source*), penerima bunyi (*receiver*), media dan gelombang bunyi (*soundwave*). Sumber bunyi dapat berupa benda yang bergetar, misalnya tali suara manusia, senar gitar, *loudspeaker*, dan tepuk tangan. Penerima bunyi dapat berupa telinga manusia maupun *microphone*. Media adalah sarana bagi bunyi untuk merambat, dapat berupa zat gas, cair, maupun padat. Tanpa media maka gelombang bunyi tidak akan dapat merambat dari sumber ke penerima bunyi.

Gelombang bunyi dapat merambat langsung melalui udara dari sumbernya ke telinga manusia. Selain itu, sebelum sampai ke telinga manusia, gelombang bunyi dapat juga terpantul-pantul terlebih dahulu oleh permukaan bangunan, menembus dinding, atau merambat melalui struktur bangunan. Perjalanan bunyi dari sumber ke telinga akan sangat menentukan karakter (kualitas dan kuantitas) bunyi tersebut. Oleh karena itu pengolahan 'jalan' bunyi tadi menjadi sangat penting untuk mendukung 'pengolahan' bunyi agar sesuai keinginan penerima bunyi. Pemilihan bentuk, orientasi dan bahan permukaan ruang akan menentukan karakter 'jalan' bunyi yang kemudian juga akan menentukan karakter bunyi.

Arsitek perlu memahami keempat elemen tata bunyi di atas agar dapat merancang dengan benar. Arsitek bahkan perlu memahami atau menghayati karakter sumber bunyi. Paduan suara (*choir, accapela*), band cadas (*rock band*), musik klasik, maupun gamelan mempunyai keindahan masing-masing yang bersifat unik. Pemahaman akan keunikan tadi akan sangat membantu arsitek dalam menyiapkan 'jalan' bagi bunyi untuk sampai ke telinga pendengar. Pemahaman akan gelombang bunyi memudahkan arsitek membayangkan sifat-sifat bunyi dan perilakunya di saat merancang karya arsitektural tertentu. Telinga manusia merupakan elemen yang mungkin paling jauh dari jangkauan kendali arsitek (karena arsitek tentu tidak

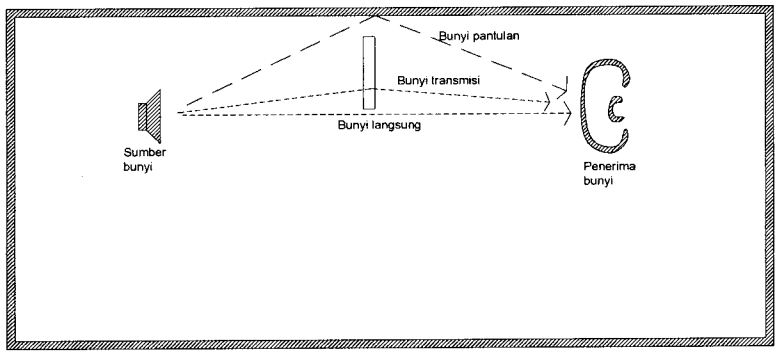
mempunyai hak mengatur telinga orang lain). Meskipun begitu pemahaman akan karakter telinga manusia pun menjadi penting bagi seorang arsitek agar dapat menghayati apa yang diinginkan oleh manusia dalam mendengar sesuatu.

5.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Akustika

Sub-bab ini akan membantu dalam memahami istilah-istilah dalam akustika. Untuk mengetahui istilah-istilah dalam akustika lebih lengkap, kunjungi:

`http://www.acousticalsolutions.com`
`/education/glossary.asp`

Akustika (*acoustics*) adalah ilmu tentang bunyi. Akustika sering dibagi menjadi akustika ruang (*room acoustics*) yang menangani bunyi-bunyi yang dikehendaki dan kontrol kebisingan (*noise control*) yang menangani bunyi-bunyi yang tak dikehendaki.



***Gambar 5.1** Sumber bunyi, media, dan penerima bunyi*

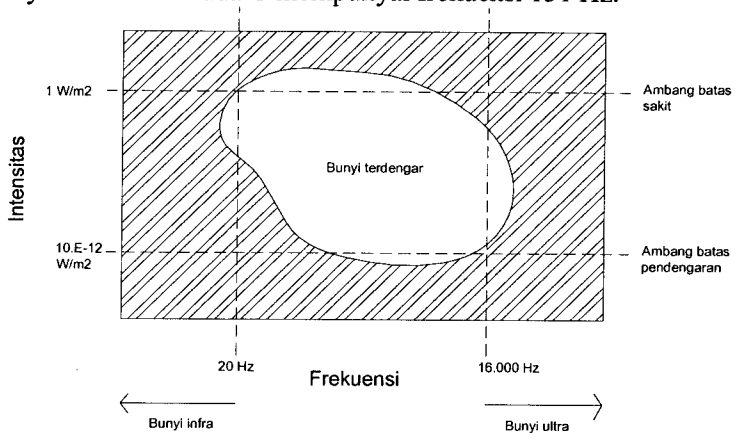
Bunyi (*sound*) adalah gelombang getaran mekanis dalam udara atau benda padat yang masih bisa ditangkap oleh telinga normal manusia, dengan rentang frekuensi antara 20 - 20.000 Hz. Kepekaan telinga manusia terhadap rentang ini semakin menyempit sejalan dengan pertambahan umur. Di bawah rentang tersebut disebut bunyi infra (*infrasound*), sedang di atas rentang tersebut disebut bunyi ultra (*ultra sound*). **Suara** (*voice*) adalah *bunyi* manusia. **Bunyi udara** (*airborne sound*) adalah bunyi yang merambat lewat udara. **Bunyi struktur** (*structural sound*) adalah bunyi yang merambat melalui struktur bangunan.

Kecepatan bunyi (*sound velocity*) adalah kecepatan rambat bunyi pada suatu media, diukur dengan m/dtk. Kecepatan bunyi adalah tetap untuk kepadatan media tertentu, tidak tergantung frekuensinya. Untuk kemudahan, kecepatan rambat bunyi di udara adalah 340 m/dtk.

***Tabel 5.1** Kecepatan bunyi dan suhu*

suhu (°C)	kecepatan (m/dtk)
-20	319,3
0	331,8
20	343,8
30	349,6

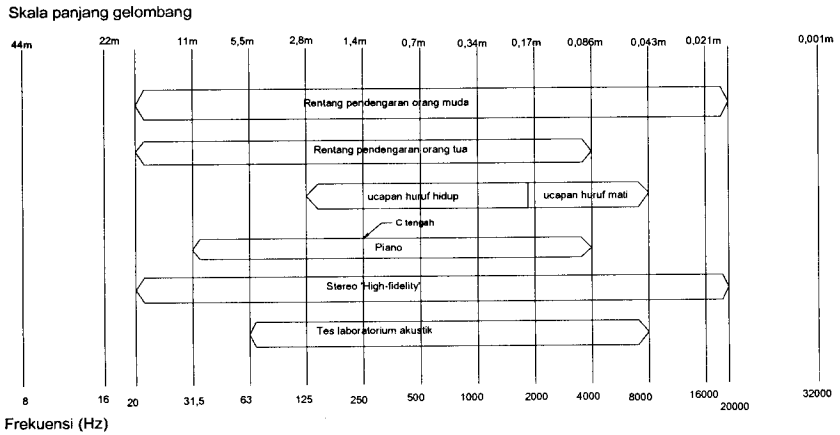
Frekuensi bunyi (*sound frequency*) adalah jumlah getaran per detik dan diukur dengan Hz (Hertz). Frekuensi menentukan tinggi rendah bunyi. Semakin tinggi frekuensi, semakin tinggi bunyi. Grand piano mempunyai rentang antara 25-4200 Hz. Percakapan manusia berada antara 600-4000Hz. Bunyi-Infra←63 ←rendah (*low*) →250 ← tengah (*mid*) →2000 ← tinggi (*high*) →16.000 → Bunyi-ultra. **Oktaf** (*octave*) adalah jarak dua bunyi yang merupakan kelipatan frekuensinya, misal: 37,5 Hz-75Hz; 75Hz-150Hz, dan seterusnya. Salah satu nada C mempunyai frekuensi 131 Hz.



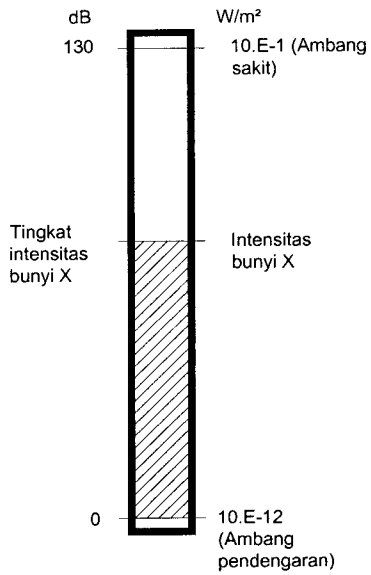
***Gambar 5.2** Batas-batas bunyi yang terdengar*

Kebisingan (*noise*) adalah bunyi atau suara yang tidak dikehendaki atau mengganggu. Gangguan bunyi hingga tingkat tertentu dapat diadaptasi oleh fisik, namun syaraf dapat terganggu. **Ambang bunyi** (*threshold of audibility*) adalah intensitas bunyi sangat lemah yang masih dapat didengar telinga manusia, berenergi 10^{-12} W/m^2. Ambang bunyi ini disepakati

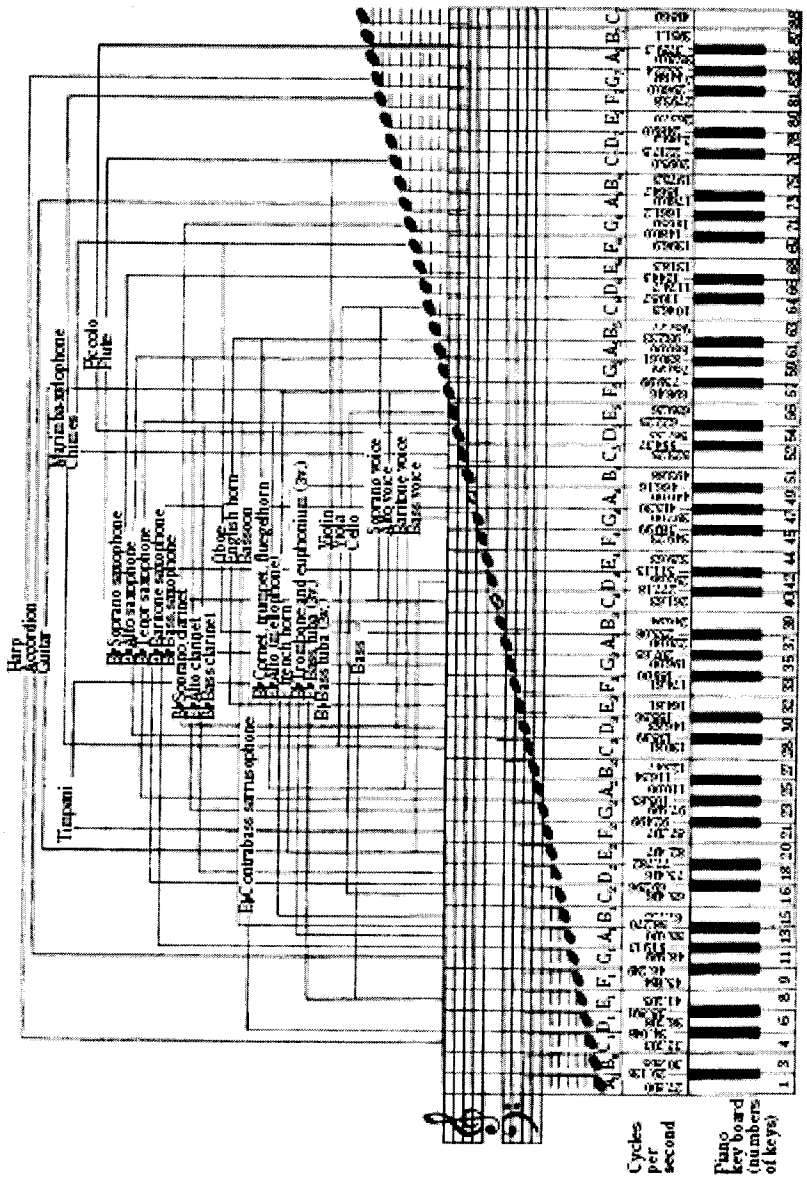
mempunyai *tingkat bunyi* 0 dB. **Ambang sakit** (*threshold of pain*) adalah kekuatan bunyi yang menyebabkan sakit pada telinga manusia, berenergi 1 W/m^2.



Gambar 5.3 *Sumber bunyi dan rentang frekuensinya*

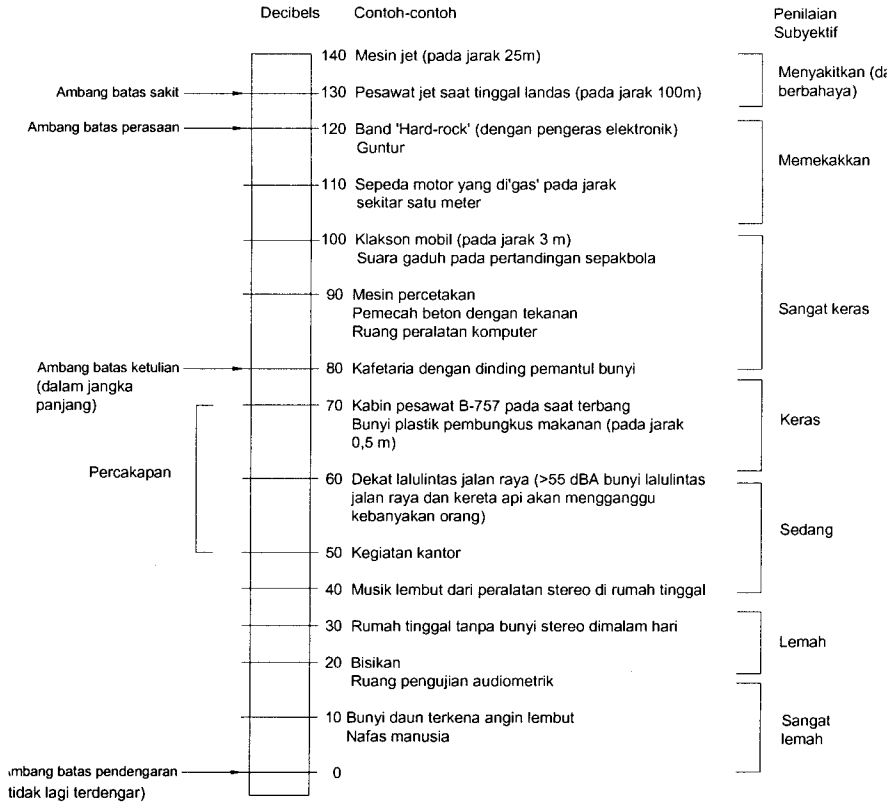


Gambar 5.4 *Skala desibel dan watt*



Gambar 5.5 *Frekuensi bunyi yang terdengar dari beberapa alat musik (Everest, 2001)*

Kriteria kebisingan (*Noise Criterion;* NC; disebut juga bunyi latar yang diperkenankan agar aktivitas tak terganggu) adalah tingkat kebisingan terendah yang dipersyaratkan untuk ruang tertentu menurut fungsi utamanya. **Pengurangan kebisingan** (*Noise Reduction*; NR) adalah pengurangan kekuatan bunyi, diukur dalam dB. **Kriteria pengurangan kebisingan** (*Noise Reduction Criteria;* NRC) merupakan perhitungan rata-rata, dibulatkan ke bilangan terdekat 0,05, antara 250, 500, 1000, 2000 (125 dan 4000 tidak ikut dihitung). Informasi NRC biasanya menyertai papan akustik.



***Gambar 5.6** Perbandingan tingkat bunyi beberapa sumber*

A, B, C *weighted decibels* (dB) adalah koreksi terhadap tingkat bunyi nyata untuk menyesuaikan dengan perasaan manusia. **A** sangat mengurangi kepekaan pada bunyi frekuensi rendah, **B** sedikit mengadakan penyesuaian, **C** tidak mengubah ukuran.

Tingkat kebisingan yang diperbolehkan (*acceptable noise level*) adalah tingkat kebisingan yang diperkenankan terjadi di suatu ruangan agar aktivitas (fungsi) tidak terganggu. Ruang tidur di rumah pribadi, misalnya, jika pada malam hari tingkat kebisingannya melebihi 25 dBA tentu akan menyebabkan gangguan.

Kehilangan Transmisi (*Transmition Loss*; TL) adalah daya media untuk menghambat bunyi, diukur dengan dB, berbeda untuk setiap frekuensi. Pori-pori dapat mengurangi TL hingga 15 dB.

Kekerasan (*loudness*) adalah kekuatan bunyi yang dirasakan oleh telinga manusia, diukur dengan *foon* atau dBA (*weighted deciBel*). Kekerasan bunyi (*loudness*) dibedakan dengan tingkat bunyi (*sound level*). Dengan kesepakatan, grafik kekerasan bunyi bertemu dengan grafik tingkat bunyi pada frekuensi 1000 Hz. Jadi 100 dB 100 Hz kurang menyakitkan dibanding 100dB 3200 Hz. Tetapi, 100 dBA (atau *foon*) 100 Hz sama menyakitkannya dengan 100 dBA 3200 Hz.

Bunyi ambien (*ambient sound*) adalah bunyi total di suatu ruangan, diukur dengan dB. Bunyi ambien ini sangat memengaruhi tingkat kebisingan. Dalam kereta api yang sedang berjalan, percakapan terpaksa dilakukan dengan lebih keras daripada percakapan di rumah pada malam hari.

***Tabel 5.2** Tingkat kebisingan yang diperbolehkan*

Bangunan	Ruangan	(dBA)
Rumah tinggal	Ruang tidur, rumah pribadi	25
	Ruang tidur, flat	30
	Ruang tidur, hotel	35
	Ruang keluarga	40
Komersial	Kantor pribadi	35-45
	Bank	40-50
	Ruang konferensi	40-45
	Kantor umum, toko	40-55
	Restoran	40-60
	Kafetaria	50-60
Industri	Bengkel presisi	40-60
	Bengkel berat	60-90
	Laboratorium	40-50
Pendidikan	Ruang kuliah, ruang kelas	30-40
	Ruang belajar privat	20-35
	Perpustakaan	35-45

Bangunan	Ruangan	(dBA)
Kesehatan	Rumah sakit, ruang inap umum	25-35
	Rumah sakit, ruang inap privat	20-25
	Ruang operasi	25-30
Auditorium	Hall konser	25-35
	Gereja	35-40
	Ruang sidang, ruang konferensi	40-45
	Studio rekaman	20-25
	Studio radio	20-30
	Teater drama	30-40

Sumber: Koenigsberger

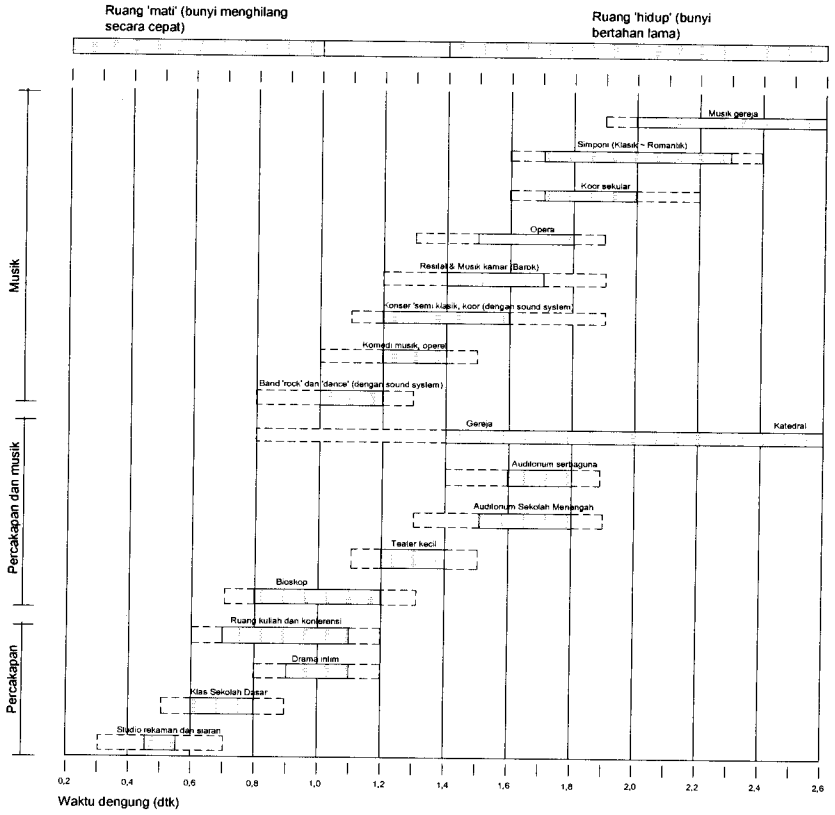
Bunyi dengung (*reverberation sound*) adalah bunyi yang terpantul-pantul. Setiap ruang mempunyai kebutuhan bunyi dengung yang berbeda-beda. Bunyi dengung dapat dibutuhkan ataupun dihindari, tergantung penggunaan ruangan. Ruangan yang khusus untuk berceramah, misalnya, tidak begitu membutuhkan dengung dibanding ruangan untuk paduan suara. Sebaliknya, bila tanpa dengung sama sekali, ruangan tentu kurang menarik bagi paduan suara.

Waktu dengung (*reverberation time*, T_R) adalah waktu yang diperlukan oleh bunyi untuk berkurang 60 dB, dihitung dalam detik (dtk). Setiap ruangan membutuhkan waktu dengung berbeda-beda tergantung dari penggunaannya. Waktu dengung terlalu pendek akan menyebabkan ruangan 'mati', sebaliknya waktu dengung yang panjang akan memberikan suasana 'hidup' pada ruangan.

Serapan (*absorption*) adalah perbandingan antara energi yang tidak dipantulkan kembali dan energi bunyi keseluruhan yang datang, diukur dengan *Sabine*. Serapan bahan akan menentukan lama waktu dengung.

Penyerapan bunyi (*sound-absorbing*), kemampuan suatu bahan untuk meredam bunyi yang datang, dihitung dalam persen, atau pecahan bernilai $0 \leq \alpha \leq 1$. Nilai 0 berarti tidak ada peredaman bunyi (seluruh bunyi yang datang dipantulkan sempurna). Sedangkan nilai 1 berarti bunyi yang datang diserap seluruhnya (tidak ada yang dipantulkan kembali. Jendela yang terbuka dianggap mempunyai $\alpha = 1$ karena seluruh bunyi tidak dipantulkan. **Sabine**, derajat serap, perbandingan antara energi yang tidak dipantulkan kembali dan energi bunyi keseluruhan yang datang. **1 m^2 Sabine** diartikan sebagai nilai serapan bunyi yang setara dengan 1 m^2 jendela terbuka (tidak

ada yang terpantul, alias terserap semua). Sedangkan, 1 ft^2 Sabine setara dengan serapan 1 ft^2 jendela terbuka.



***Gambar 5.7** Waktu dengung*

Kekedapan bunyi (*sound-proofing*), kemampuan suatu bahan untuk menahan bunyi atau mengurangi intensitas bunyi yang datang dari satu sisi ke sisi lain, dihitung dalam dB. **Papan akustik** (*acoustics board*) adalah bahan khusus yang dibuat untuk fungsi menyerap bunyi pada frekuensi tertentu. Selain data NRC (*noise reduction criteria*), data laboratorium harus menyertakan konstruksinya karena akan memengaruhi nilai α-nya. Panel yang dipasang berselang-seling seperti papan catur akan sedikit lebih baik dibanding panel dengan luasan sama dipasang rapat. Ini dinamakan *area effect*, yaitu penambahan area dari tepi-tepi panel.

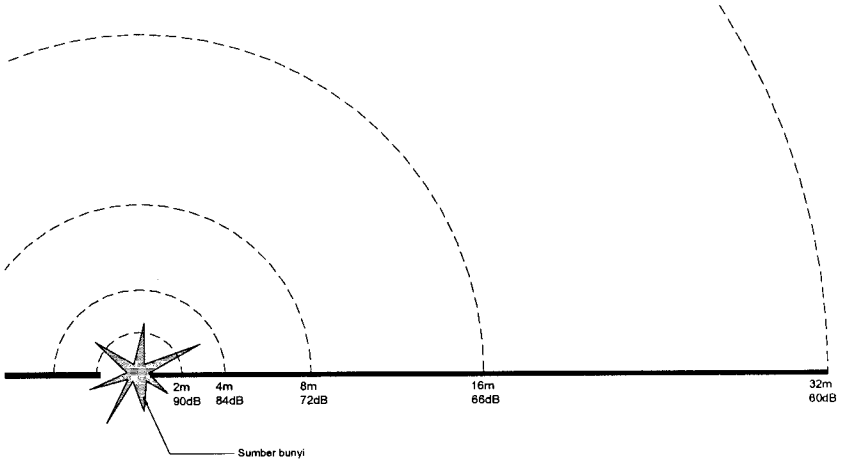
Intensitas Bunyi (*sound intensity*) adalah banyaknya energi bunyi per unit luasan, diukur dengan watt/m^2.

Tabel 5.3 *Sumber bunyi dan intensitas bunyi*

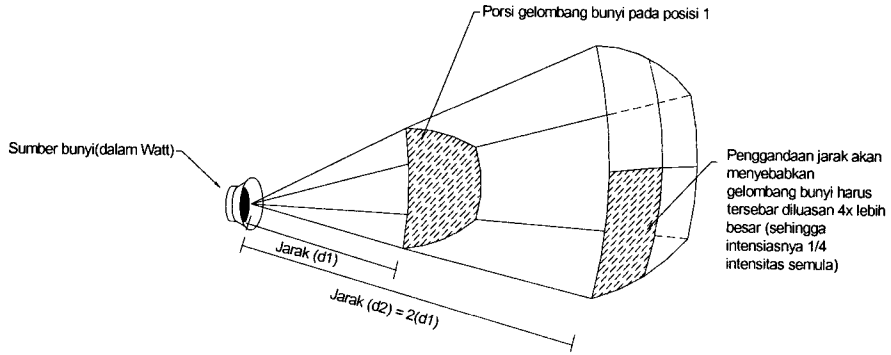
Sumber bunyi	Intensitas (W/m^2)	Tingkat intensitas (dB)
Roket ruang angkasa	$>10^7$	>190
Pesawat jet	10^4	160
Orkes brass besar	10	130
Mesin besar	10	120
Orkes lengkap	10^{-2}	100
Mobil penumpang di jalan raya	10^{-2}	100
Percakapan normal	10^{-5}	70
Bisikan lembut	10^{-9}	30

Sumber: Blauert, 2008

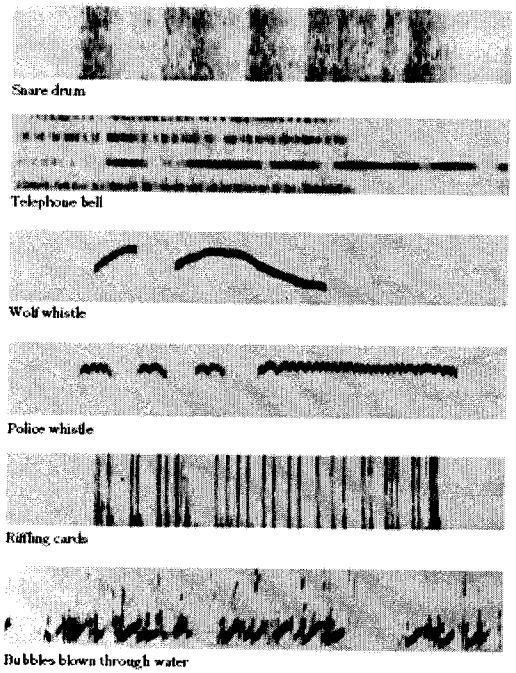
Tingkat bunyi (*sound level*) adalah perbandingan logaritmis energi suatu sumber bunyi dengan energi sumber bunyi acuan, diukur dalam dB (*deciBel*). Energi sumber bunyi acuan adalah energi sumber bunyi terendah yang masih dapat didengar manusia, yaitu 10^{-12} W/m^2. Setiap penggandaan jarak, tingkat bunyi berkurang 6 dB. Setiap penggandaan sumber bunyi, tingkat bunyi akan bertambah 3 dB. Setiap penggandaan massa dinding, tingkat bunyi akan berkurang 5 dB. Setiap penggandaan luas bidang peredam, tingkat bunyi akan berkurang 3 dB.



Gambar 5.8 *Pengurangan tingkat bunyi akibat jarak*

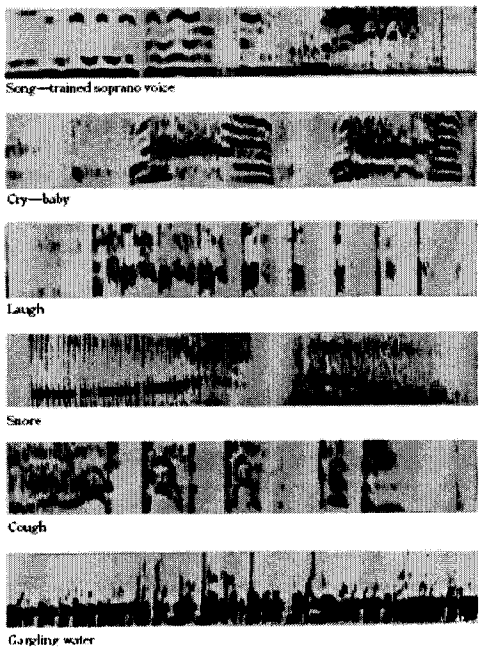


Gambar 5.9 *Hukum kuadrat terbalik*

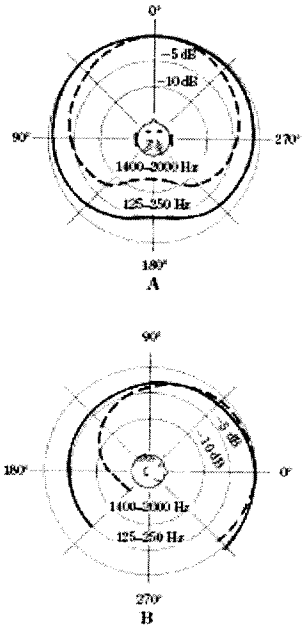


Gambar 5.10 *Spektogram beberapa bunyi, tebal-tipis garis menunjukkan intensitas, tinggi rendah menunjukkan frekuensi dan arah ke kanan menunjukkan waktu (AT&T Lab dalam Everest, 2001)*

Warna bunyi (*timbre*) adalah efek yang ditimbulkan oleh perpaduan antara beberapa frekuensi bunyi yang ditimbulkan oleh satu sumber bunyi. Warna bunyi akan khas dan memungkinkan Anda mengenali jenis sumber bunyi. *Timbre* membedakan suara flute dengan biola walau keduanya memainkan kunci nada yang sama. Ukuran *timbre* sangat subjektif. Ada hubungan antara warna bunyi dan spektrum bunyi tetapi keduanya berbeda (Everest, 2001). Garpu tala (atau peluit tala) akan mengeluarkan nada bunyi tunggal, seperti C, D, E, F, dan seterusnya. Namun sebagian besar bunyi yang dikeluarkan oleh sumber bunyi merupakan gabungan dari berbagai frekuensi. Bahkan suara kita masing-masing pun berbeda. Dengan alat **penganalisis spektrum bunyi** (*sound spectrum analyzer*) Anda dapat memetakan sidik bunyi suatu sumber. ***Tabel 5.4*** menampilkan beberapa sumber bunyi dan sebaran frekuensinya. Mohon tidak dikacaukan antara dB dan dBA! Terlihat bahwa setiap sumber bunyi mempunyai distribusi yang berbeda pada rentang frekuensi 63 hingga 8000 Hz. Suara burung paling keras pada frekuensi 8000 Hz, sedang anjing pada 1000 Hz. (Tentu saja itu burung kecil dan anjing besar!)



Gambar 5.11 *Spektogram beberapa suara manusia (AT&T Lab dalam Everest, 2001)*



Gambar 5.12 *Distribusi intensitas suara manusia yang keluar dari mulut. Di arah belakang kepala, intensitas nada tinggi lebih banyak berkurang daripada nada rendah (Kuttruff dalam Everest, 2001)*

Tabel 5.4 *Tingkat bunyi beberapa sumber bunyi*

	Tingkat Bunyi (dB)								(dBA)
Frekuensi →	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
RUMAH									
Alarm jam weker jarak 1 – 3 m	..	46	48	55	62	62	70	80	80
Pencukur listrik jarak 4 m	59	58	49	62	60	64	60	59	68
Penyedot debu jarak 9 m	48	66	69	73	79	73	73	72	81
Penghancur sampah jarak 6 m	64	83	69	56	55	50	50	49	69
Mesin cuci jarak 6 – 9 m	59	65	59	59	58	54	50	46	62
Toilet (pada saat mengisi air kembali)	50	55	53	54	57	56	57	52	63
Kolam gelombang dengan 6 pipa	68	65	68	69	71	71	68	65	74
AC tipe jendela	64	64	65	56	53	48	44	37	59
Bel telepon jarak 1 - 4 m	..	41	44	56	68	73	69	83	83

	Tingkat Bunyi (dB)								(dBA)
Frekuensi →	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
TV jarak 3 m	49	62	64	67	70	68	63	39	74
Stereo (tingkat mendengarkan remaja)	60	72	83	82	82	80	75	60	86
Stereo (tingkat mendengarkan dewasa)	56	66	75	72	70	66	64	48	75
Biola jarak 1,5 m	..	..	91	91	87	83	79	66	92
Percakapan normal jarak 1 m	..	57	62	63	57	48	40	..	63
RUANG LUAR									
Suara burung jarak 3 m	..	..	..	..	..	50	52	54	57
Uir-uir	..	..	..	..	35	51	54	48	57
Salak anjing besar jarak 15 m	..	50	58	68	70	64	52	48	72
Pemotong rumput jarak 1,5 m	85	87	86	84	81	74	70	72	86
Tembakan pistol jarak 80 m	..	..	..	83	91	99	102	106	106
Selancar jarak 3-5 m (laut sedang)	71	72	70	71	67	64	58	54	78
Angin di pohon 16 km/jam	..	..	..	33	35	37	37	35	43
TRANSPORTASI									
Truk besar jarak 15 m (90 km/jam)	83	85	83	85	81	76	72	65	86
Mobil penumpang jarak 15m (90km/jam)	72	70	67	66	67	66	59	54	71
Sepeda motor jarak 15 m (gas penuh, tanpa saringan knalpot)	95	95	91	91	91	87	87	85	95
Mobil salju jarak 15 m	65	82	84	75	78	77	79	69	85
Kereta api menarik beban berat jarak 30 m	95	102	94	90	86	87	83	79	94
Peluit kereta api jarak 15 m	88	90	110	110	107	100	91	78	109
Klakson mobil jarak 5 m	..	..	..	92	95	90	80	60	97
Pesawat terbang komersial dengan baling-baling jarak 1,6 km (dari jarak lintasan tinggal landas)	77	82	82	78	70	56	..	..	79
Helikopter militer jarak 150 m (mesin tunggal, ukuran sedang)	92	89	83	81	76	72	62	51	80
RUANG DALAM									
Pertunjukan musik cadas keras (arena besar)	116	117	119	116	118	115	109	102	121
Ruang audiovisual	85	89	92	90	89	87	85	80	94
Tepukan di auditorium	60	68	75	79	85	84	75	65	88
Ruang kelas	60	66	72	77	74	68	60	50	78
Ruang peralatan komputer	78	75	73	78	80	78	74	70	84
Kandang anjing	..	..	90	104	106	101	89	79	108

	Tingkat Bunyi (dB)								(dBA)
Frekuensi →	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
Gimnasium	72	78	84	89	86	80	72	64	90
Dapur	86	85	79	78	77	72	65	57	81
Laboratorium	65	70	73	75	72	69	65	61	77
Perpustakaan	60	63	66	67	64	58	50	40	68
Ruang peralatan mesin	87	86	85	84	83	82	80	78	88
Ruang latihan musik	90	94	96	96	96	91	91	90	100
Lapangan bola raket	82	85	80	85	83	75	68	62	86
Area penerima tamu dan lobi	60	66	72	77	74	68	60	50	78
Konferensi jarak jauh	65	74	78	80	79	75	68	60	83

Sumber: Egan, 1988.

5.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar

Sub-bab ini memberikan ringkasan pengetahuan di sekitar akustika yang perlu diketahui untuk melengkapi pemahaman terhadap bunyi.

Percakapan manusia (*human speech*) berada di antara frekuensi 600 - 4000 Hz. Telinga manusia paling peka terhadap rentang frekuensi antara 100 - 3200 Hz (panjang gelombang antara 10 cm – 3 m). Kepekaan telinga manusia berbeda untuk frekuensi yang berbeda. Dengan energi yang sama, frekuensi tinggi lebih mudah didengar. (Ini salah satu alasan mengapa peluit bernada tinggi). Sedangkan bunyi frekuensi rendah merambat lebih jauh. Ini menjelaskan mengapa dari kejauhan kita dapat mendengar bunyi bas dengan lebih baik. Jarak sumber bunyi mengurangi tingkat kekuatan bunyi karena energi bunyi diserap oleh molekul-molekul media rambatannya. Hal ini terutama terasa pada bunyi frekuensi tinggi. Rentang tingkat bunyi sebuah orkestra antara 25 – 100 dB.

Di daerah pedesaan, bunyi-bunyian alami (angin, aliran sungai, burung, gemerisik dedaunan jarang menjadi kebisingan karena jarang melewati ambang batas pendengaran. Letak bangunan yang berjauhan, ruang-ruang terbuka, serta pepohonan, membantu meredam bunyi. Di pedesaan, masyarakat lebih saling mengenal daripada di perkotaan. Oleh karena itu di desa setiap bunyi mengandung simbol-simbol yang sangat dikenali oleh masyarakatnya. Di perkotaan bunyi dari lingkungan saling asing, menjadi potensi gangguan.

Di daerah tropis, masyarakat banyak beraktivitas di luar rumah. Perkembangan budayanya berbeda dengan masyarakat daerah dingin yang lebih banyak di dalam ruangan. Penanganan akustik ruang luar lebih sulit

daripada ruang dalam. Budaya akan memengaruhi tingkat kebisingan. Untuk budaya masyarakat yang suka bersosialisasi di luar ruang (sambil menyanyi, bercakap-cakap, dan memainkan alat musik), toleransi terhadap kebisingan lebih tinggi daripada masyarakat yang menjunjung tinggi *privacy*. Di area pemukiman negara tropis berkembang, tingkat kebisingan 65-70 dBA masih dianggap wajar. Sedang untuk masyarakat negara dingin maju, tingkat kebisingan tersebut sudah sangat mengganggu. Mereka mempunyai standar 40-45 dBA. Untuk masyarakat yang suka berkumpul, kesunyian akan menyebabkan perasaan terisolasi.

Angin dapat mendistorsi bunyi. Bunyi searah arah angin akan dipercepat, sedangkan bunyi berlawanan arah angin akan diperlambat. Selain itu, suhu juga memengaruhi bunyi. Suhu udara memengaruhi kecepatan rambat bunyi. Semakin tinggi suhu udara, semakin tinggi kecepatan bunyi.

Untuk bunyi berfrekuensi tinggi, penghalang akan menciptakan bayangan akustik (*acoustic shadow*); untuk bunyi frekuensi rendah penghalang akan menciptakan pembiasan akustik (*acoustic defraction*). Penghalang bunyi (*sound barrier*) lebih efektif bila diletakkan di dekat sumber bunyi. Dinding pembatas ruang setengah tinggi dapat mengurangi kebisingan hingga 8 - 10 dB. Bila penggunaan bahan masif untuk penghalang bunyi tidak praktis maka dapat digunakan bahan yang terdiri atas susunan beberapa lapisan bahan. Pengurangan terbesar transmisi bunyi adalah pada permukaan bahan, yaitu pada perbedaan kerapatan bahan.

Harmonik adalah beresonansinya suatu benda dengan frekuensi 2x, 4x, 8x, 16x, dan seterusnya dari frekuensi sumber bunyi asli. Kebisingan dapat terjadi oleh resonansi, yaitu bergetarnya suatu benda oleh bunyi.

Tabel 5.5 *Perubahan tingkat bunyi dan efeknya*

Perubahan Tingkat Bunyi (dB)	Efek
1	Tidak terasakan
3	Mulai dapat dirasakan
6	Dapat dirasakan dengan jelas
10	Dirasakan dua kali lebih keras (atau lebih lemah) dari bunyi awal
20	Dirasakan empat kali lebih keras (atau lebih lemah) dari bunyi awal

Cara mencari tingkat bunyi gabungan antardua atau beberapa sumber bunyi bila masing-masing diketahui tingkat bunyinya:

Tabel 5.6 *Angka penambahan pada penjumlahan bunyi*

Perbedaan tingkat bunyi antara dua sumber (dB)	Bilangan penambah pada sumber bunyi yang tingkat bunyinya lebih tinggi (dB)
0 – 1	3
2 – 3	2
4 – 8	1
9 -	0

Material dengan α (bilangan serap) > 0,5 termasuk peredam bunyi, sedang α < 0,2 termasuk pemantul bunyi. ***Tabel 5.7*** menunjukkan perbedaan koefisien dan efek pada pendengaran.

Tabel 5.7 *Perbedaan koefisien serap dan efeknya*

Perbedaan Koefisien	Efek
< 0,10	Tidak kentara
0,10 - 0,40	Kentara
> 0,40	Sangat kentara

Kekerasan bunyi dapat menimbulkan dampak buruk bagi kesehatan manusia. ***Tabel 5.8*** menampilkan tingkat kebisingan dan efeknya pada manusia. Di samping frekuensi yang terdengar, frekuensi yang tidak terdengarpun dapat mempunyai efek negatif. Getaran peralatan listrik yang tidak terdengar, bila cukup keras akan menyebabkan tubuh bereaksi dengan gejala gelisah, berkeringat, dan sebagainya. Efek bunyi dapat menjadi sangat buruk bila terjadi komplikasi. Misalnya, bunyi keras dari jenis musik yang tidak disukai, yang berlangsung lama dan terus-menerus, bahkan bisa membuat seseorang kehilangan kontrol atas emosinya.

Tabel 5.8 *Pengaruh kekerasan bunyi pada manusia*

Kebisingan (dBA)	Efek
30 - 65	Bila berlangsung terus-menerus akan mengganggu selaput telinga dan menyebabkan gelisah
65 - 90	Bila berlangsung terus-menerus akan merusak lapisan vegetatif manusia (jantung, peredaran darah, dan lain-lain.)
90 - 130	Bila berlangsung terus-menerus akan merusak telinga

Penyerap bunyi (sering disebut papan akustik) ditawarkan dalam banyak tipe, baik yang digunakan untuk menyerap frekuensi tinggi, menengah maupun rendah. Pada umumnya, karakter fisik bahan menentukan kegunaannya, seperti terlihat pada tabel berikut. Pemakaian bahan penyerap

harus didasari pemahaman akan fungsi akustik ruang: (1) Mengubah gelombang bunyi menjadi kalor, ditunjukkan dengan adanya pori-pori, (2) Mengubah gelombang bunyi menjadi mekanis (resonansi), ditunjukkan dengan bahan yang lembek dan mudah bergetar.

***Tabel 5.9** Jenis peredam dan kegunaannya (Kinsler, 2000)*

	Jenis peredam	Kegunaan
1	Peredam berpori, dan berserat	Baik untuk meredam frekuensi tinggi. Harus tebal untuk meredam frekuensi rendah.
2	Peredam membran	Baik untuk meredam frekuensi rendah
3	Peredam resonan	Dapat disesuaikan untuk meredam frekuensi tertentu
4	Peredam panel berongga (*Helmholtz resonators*)	Merupakan paduan peredam berpori dan resonan, baik untuk meredam frekuensi menengah

Catatan: Mengecat dinding dengan cat *akustik* (dari pasir dan kerang) tidak akan bermanfaat.

***Tabel 5.10** Perbedaan jarak bunyi dan efeknya*

Perbedaan jarak bunyi (m)	Keterlambatan (milidetik)	Kondisi
< 7	< 20	istimewa untuk musik dan percakapan
7 - 10	20 – 30	cukup bagus untuk musik, lumayan untuk percakapan
10 - 15	30 – 45	pas-pasan (*blurred*)
15 - 20	45 – 60	tidak memuaskan
> 20	> 60	jelek (*echo*)

Salah satu cara untuk menilai kualitas akustik suatu ruang, selain dengan ukuran objektif ,juga dapat dilakukan dengan memakai pendapat subjektif dari para pengguna gedung bersangkutan. Tabel 5.11 menyajikan beberapa pertanyaan untuk menjaring pendapat pengguna gedung.

***Tabel 5.11** Pertanyaan untuk survai tanggapan subjektif (Barron, 1998)*

Clarity *Muddy* ←----------→ *Clear*
Reverberance *Dead* ←----------→ *Live*
Envelopment *Expansive* ←----------→ *Constricted*
Intimacy *Remote* ←----------→ *Intimate*
Loudness *Loud* ←----------→ *Quiet*

Balance:
Treble *Weak* ←----------→ *Loud*
Bass *Weak* ←----------→ *Loud*
Singers/soloists *Weak* ←----------→

Background noise:
Inaudible - Acceptable - Tolerable - Intolerable

Overall impression:
Very poor - Poor - Mediocre - Reasonable - Good - Very good - Excellent

5.3 Aspek Perancangan

Pada sub-bab ini akan dibahas berbagai aspek perancangan, antara lain prosedur perancangan, strategi umum penanganan kebisingan, strategi penanganan kebisingan ruang luar, strategi penanganan kebisingan ruang dalam, dan lain-lain.

5.3.1 Prosedur Perancangan

Dalam merancang akustik ruangan, arsitek harus selalu kembali mengingat keempat elemen akustik (sumber, penerima, media, dan gelombang bunyi). Prosedur di bawah ini dapat dipergunakan untuk membantu pemikiran perancangan akustik suatu ruang.

- **Mengenali fungsi utama ruangan**. Mengenali fungsi ruangan akan menjadi titik tolak pertimbangan akustik. Bisa saja sebuah ruangan tidak memerlukan penataan akustik sama sekali, misalnya gudang. Sebaliknya, sebuah ruang dapat membutuhkan pertimbangan akustik yang sangat rumit (ruangan konser musik klasik besar), apalagi bila akan dipakai untuk pertunjukan musik yang berbeda-beda karakter. Mengenali fungsi utama ruangan akan memudahkan Anda menentukan waktu dengung (T_R) dan kriteria kebisingan (NC) yang pas. Ruangan untuk fungsi utama ceramah membutuhkan waktu dengung yang jauh lebih pendek daripada ruangan untuk fungsi pergelaran musik gereja. Pada tahap ini Anda dapat menentukan bentuk ruang, volume, dan bentuk serta bahan permukaannya (dinding, lantai, langit-langit). Mengenali fungsi utama ruangan

akan sekaligus memudahkan Anda untuk memperkirakan karakter audiensinya.

- **Mengenali lingkungan sekitar ruangan**. Bila Anda akan merancang ruangan untuk pertunjukan musik serius semacam musik klasik, maka gangguan bunyi dari luar akan sangat mengganggu. Bisa juga sebaliknya, lingkungan perumahan yang tenang akan sangat terganggu oleh suara band cadas dari dalam ruangan. Dengan mengenali karakter lingkungan maka Anda dapat menentukan seberapa jauh ruangan harus kedap suara. Lingkungan yang amat bising (di pinggir rel kereta api, dekat jalan raya, atau bandar udara) akan menyebabkan kebutuhan penanganan penutup ruang yang cukup berat agar kebisingan tadi tidak terdengar sama sekali dari dalam. Pada tahap ini Anda dapat menentukan *Transmission loss* (TL) penutup bangunan. Pada tahap ini Anda juga dapat mengatur pengelompokan ruang (*zonning*) untuk menempatkan ruangan yang membutuhkan penanganan akustik pada daerah yang paling terlindung.
- **Merancang detail.** Bila kondisi lingkungan sudah dipahami, maka dapat dirancang bahan-bahan penutup ruangan yang pas. Bila yang dibutuhkan adalah penyerapan frekuensi tinggi, tentunya yang diperlukan adalah bahan yang mempunyai koefisien serapan bunyi frekuensi tinggi lebih banyak. Perlu dipikirkan pula bahwa elemen akustik harus dirancang sedemikian rupa sehingga dapat sekaligus menjadi elemen estetik arsitektural.

5.3.2 Strategi Umum Penanganan Kebisingan

- Langkah awalnya adalah menangani kebisingan pada sumbernya dengan mengatur sedemikian rupa agar sumber bunyi mengeluarkan intensitas bunyi minimal. Sebagai contoh, sepeda motor dengan saringan knalpot sempurna tentu jauh lebih tidak bising dibanding sepeda motor yang saringan knalpotnya dibuka. Bila memungkinkan, bungkamlah sumber kebisingan dengan memberikan penutup yang melingkupi sumber tadi dari bahan yang memiliki hambatan suara tinggi (TL besar, kehilangan transmisi besar). Beberapa cara untuk mengurangi kebisingan dari mesin (Blauert, 2008):
  - 'ledakan' dapat dikurangi dengan merancang ulang kamar pembakaran;

  - Aliran turbulen akan menyebabkan kebisingan, mengurangi kecepatan angin dengan memperlambat kipas atau memperbesar penampang *duct* dapat mengurangi kebisingan;
  - Aliran bolak-balik tidak boleh digabungkan dengan ruang beresonan;
  - Gesekan mesin dapat dikurangi dengan lubrikasi;
  - Pemakaian fondasi berpegas.
- Bila tidak mungkin menangani sumber kebisingan secara langsung maka tangani media rambatan bunyi. Getaran mesin dapat merambat melalui lantai yang akan menjadi kebisingan di ruang lain. Pemakian pegas atau peredam getar langsung pada mesin akan memotong rambatan bunyi. Permukaan-permukaan yang tidak memantulkan bunyi akan sangat membantu mengurangi kebisingan.
- Jika kedua hal di atas tidak memungkinkan maka terpaksa penanganan kebisingan dilakukan pada penerima bunyi. Pelindung telinga (*ear protector*) sangat diperlukan untuk melindungi telinga dari ketulian akibat kebisingan yang berat.

5.3.3 Strategi Penanganan Kebisingan Ruang Luar

- Manfaatkan jarak karena tingkat bunyi akan semakin berkurang bila jarak semakin besar. Untuk bangunan yang kritis, bila mungkin, carilah lokasi yang gangguan kebisingannya minimal. Membuat studio rekaman, atau hall konser, didekat rel kereta api atau lapangan udara tentu memerlukan penanganan akustik lebih berat dan mahal untuk membebaskan hall dari suara bising yang berasal dari luar.
- Mengelompokkan kegiatan yang berpotensi bising dan yang memerlukan ketenangan.
- Memberi tabir (penghalang bunyi).
- Memanfaatkan daerah yang tidak terlalu mensyaratkan ketenangan sebagai perintang kebisingan dengan cara pengaturan daerah (*zonning*).
- Menjauhkan bukaan (pintu dan jendela) dari sumber kebisingan.

5.3.4 Strategi Penanganan Kebisingan Ruang Dalam

- Mengusahakan peredaman pada sumber kebisingan.
- Mengisolasi sumber kebisingan atau memakai penghalang bunyi.
- Mengelompokkan ruang yang cenderung bising, menempatkan ruang-ruang yang tidak terlalu perlu ketenangan sebagai pelindung ruang-ruang yang memerlukan ketenangan.
- Meletakkan sumber-sumber bising pada bagian bangunan yang masif (misalnya *basement*).
- Mengurangi kebisingan akibat bunyi injak dengan bahan-bahan yang lentur.
- Mengurangi kebisingan pada ruangan bising dengan bahan peredam.
- Mengurangi kebisingan dengan memutuskan jalan perambatan bunyi melalui struktur bangunan (dengan memisahkan bangunan).

5.3.5 Auditorium

Agar ruang auditorium dapat digunakan untuk bicara dengan baik maka (M.D. Egan, 1988):

- Tingkat bunyi pembicara harus lebih besar 15 dB dari kriteria kebisingan ruangan.
- Volume per kursi, antara 2,25 – 4,25 m^3.
- Waktu dengung (T_R); < 1,2 bila digunakan untuk teater (diutamakan frekuensi 250 – 4000 Hz), < 0,8 bila digunakan sebagai ruang kelas. Penyerapan bunyi disesuaikan dengan frekuensi bicara, panel-panel diletakkan di dinding, bukan di langit-langit, karena langit-langit dimanfaatkan untuk memantulkan bunyi ke belakang.
- Perbedaan jarak antara bunyi langsung dan tak langsung < 11m.
- Kemiringan penonton > 7°.
- Bunyi latar belakang <34 dBA, NC 25.
- Bila kapasitasnya lebih dari 500 kursi, sebaiknya memakai pengeras suara.

- Ekspresi wajah dapat dikenali dari jarak <12 m, gerak tubuh < 20m, gerakan besar < 30m.
- Sudut arena kursi sebaiknya 140°.
- Arena stage 400 kursi, open stage 700 kursi, proscenium stage 1000 kursi.

5.3.6 Strategi untuk Ventilasi

Ventilasi alami sulit diterapkan untuk ruangan yang mengharuskan kedap bunyi. Prinsip ventilasi alami adalah membuat bukaan seluas-luasnya yang akan menyebabkan bunyi yang tidak dikehendaki dari luar tidak masuk ke dalam ruangan. Oleh karena itu, kecuali memang diinginkan agar elemen bunyi alam bisa masuk ruangan, sebaiknya ruangan yang menghendaki pengendalian akustik ketat memakai ventilasi buatan (AC) saja. Beberapa pertimbangan untuk instalasi AC:

- Untuk auditorium angin merata dan pelan (agar tidak berisik), lubang difuser yang lebar akan mengurangi desis karena kecepatan angin rendah. Namun perlu diusahakan difuser merata agar kecepatan angin yang sesuai dapat mencapai penghuni secara merata. Ruang ini sebaiknya memakai AC model sentral. Permukaan bagian dalam saluran udara (*duct*) dilapisi peredam dan dibelokkan.
- Untuk ruang-ruang biasa, seperti kantor pribadi, ruang tidur, dapat dipakai AC model terpisah (*split*) yang tingkat kebisingannya rendah. AC model ini memiliki dua unit terpisah, *indoor* dan *outdoor*. Keduanya dihubungkan dengan pipa-pipa untuk medium penyejuk (*refrigerant*) dan pembuangan air kondensasi yang dapat melewati lobang berdiamater sekitar 7 cm saja. Karena kompresor ada di luar maka kebisingan dapat ditekan.

5.3.7 Penanganan Resonansi

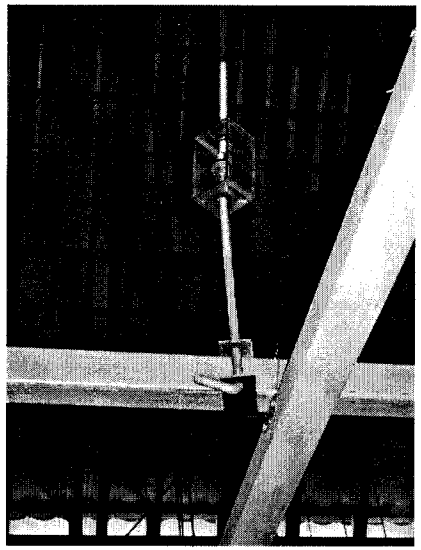
Biasanya mesin-mesin yang memiliki bagian bergerak, selain mengeluarkan bunyi yang merambat melalui udara, juga bergetar. Getaran ini akan merambat melalui struktur dan dapat menyebabkan kebisingan di ruang lain. Oleh karena itu jalan perambatan getaran perlu dipotong dengan meletakkan mesin pada landasan yang diberi peredam getaran. Prinsipnya, energi getaran diserap oleh pegas tadi.

- Pegas lembek dimanfaatkan untuk meredam getaran mesin rendah karena pegas tersebut mau mengikuti getaran/guncangan mesin, sehingga energinya terserap.
- Sebaiknya, pegas keras dimanfaatkan untuk meredam getaran tinggi.
- Massa yang masif, berat, dan mengapung pada bahan yang lembek (pegas) akan meredam rentang frekuensi lebih lebar.

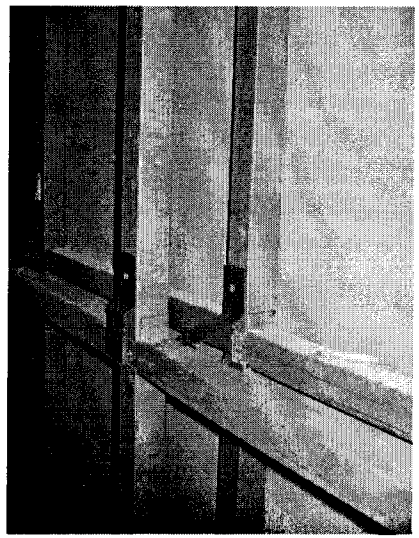
5.3.8 Pemilihan Bahan Akustik

Dalam pemilihan bahan akustik perlu dipertimbangkan hal-hal berikut:

- Mempunyai koefisien serap (α) yang sesuai dengan kebutuhan penyerapan.
- Penampilan sesuai dengan karakter estetik ruangan (papan akustik yang putih bersih berkesan murah buatan pabrik mungkin akan merusak estetika ruangan yang dimaksudkan untuk ruangan berselera artistik tinggi!)
- Tahan terhadap api.
- BIaya pemasangan memadai.
- Pemasangan mudah dan menyediakan akses mudah ke ruangan di belakang (atau di atas) papan akustik.
- Awet, dapat menahan kondisi kerja tertentu (suhu, kelembaban, dan lain-lain.), tahan terhadap uap air dan kondensasi, tahan terhadap jamur.
- Memiliki bilangan pantul cahaya yang sesuai dengan rancangan pencahayaan ruangan.
- Perawatan mudah.
- Keterpaduan dengan elemen-elemen lain dalam ruangan (pintu, jendela, luminer, dan lain-lain).
- Tidak terlalu berat, jika mungkin mudah digeser.



Gambar 5.13 *Pencegat rambatan bunyi berupa pegas yang dapat dibuat dengan cara sederhana dan cukup efektif (Satwiko, 2006)*



Gambar 5.14 *Pencegat rambatan bunyi pada dinding ganda yang dapat dibuat dengan cara sederhana dari lempengan besi. Rongga dinding diisi glass wool (Satwiko, 2006)*

5.4 Aspek Matematis

Sub-bab ini meringkas rumus-rumus yang banyak dipakai dalam akustika.

5.4.1 Kecepatan Bunyi, V

$$\mathbf{V = f\lambda \ m/dtk.}$$

dengan V = kecepatan bunyi, m/dtk.
f = frekuensi bunyi, 1/dtk (Hz).
λ = panjang gelombang, m.

5.4.2 Intensitas Bunyi, I

$$\mathbf{I = w/4\pi D^2 \ W/m^2.}$$

dengan I = intensitas bunyi, W/m^2.
w = energi yang dikeluarkan oleh sumber bunyi, watt.
D = jarak, m.

5.4.3 Tingkat Bunyi, L_I, L_P, L_W

Tingkat bunyi adalah perbandingan logaritmis antara satu sumber bunyi dengan sumber bunyi acuan. Tergantung dari besaran yang tersedia (W/m^2, N/m^2, atau W saja), tingkat bunyi dapat dihitung sebagai L_I (Tingkat intensitas bunyi), L_P (Tingkat tekanan bunyi), maupun L_W (tingkat daya bunyi). Kesemuanya dengan dimensi dB. Dalam konteks akustik bangunan, L_I dianggap sama dengan L_P. Sedangkan L_W biasanya digunakan di laboratorium tes untuk menilai sumber bunyi dengan tidak tergantung pada lingkungannya.

Dalam rumus ketiga tingkat bunyi dapat dituliskan:

$$\mathbf{L_I = 10 \log I/I_0 \ dB.}$$

dengan L_I = tingkat intensitas bunyi, dB.
I = intensitas bunyi, W/m^2.
I_0 = intensitas bunyi acuan, diambil 10^{-12} W/m^2.

$$\mathbf{L_P = 20 \log P/P_0 \ dB.}$$

dengan L_P = tingkat tekanan bunyi, dB.
P = tekanan bunyi, N/m^2 atau Pa.
P_0 = tekanan bunyi acuan, diambil 2.10^{-5} N/m^2.

$$\mathbf{L_W = 10 \log W/W_0 \ dB.}$$

dengan L_W = tingkat daya bunyi, dB.
W = daya bunyi, W.
W_0 = daya bunyi acuan, diambil 10^{-12} W.

Hendaknya ketiga rumus di atas tidak membuat bingung, namun malah memudahkan. Pada buku ini L_I lebih banyak dipakai sehingga istilah *tingkat intensitas bunyi* sering disingkat dengan *tingkat bunyi*. Namun harap tidak dikacaukan antara *tingkat bunyi* (dB) dan *intensitas bunyi* (W/m^2).

5.4.4 Kehilangan Transmisi (*Transmisson Loss*), TL

Transmition loss (TL) dinding homogen tak berpori, dihitung rata-rata untuk 50 – 5000 Hz:

dengan $\mathbf{TL_{rata\text{-}rata} = 18 \log M + 8 \ dB.}$

Sedangkan untuk menghitung TL pada frekuensi tertentu:

$$\mathbf{TL_f = 18 \log M + 12 \log f - 25 \ dB}$$

dengan M = massa dinding, kg/m^2.
f = frekuensi, Hz.

5.4.5 Waktu Dengung (*Reverberation Time*), T_R

Rumus Sabine → $T_R = 0{,}16(V/\Sigma S\alpha)$ dtk.

Dengan 0,16 = konstanta
V = volume ruang, m^3.
$\Sigma S\alpha$ = penyerapan total pada frekuensi bunyi bersangkutan, Sabine, biasanya dihitung berdasarkan frekuensi 125, 250, 500, 1000, dan 2000 Hz (500 - 1000 Hz umumnya dijadikan acuan untuk menghitung waktu dengung ruang). **$\Sigma S\alpha$** sering disingkat dengan **a** saja.

Untuk ruang studio rekaman atau ruang tanpa gema (*unechoic chamber*), karena perbandingan antara serapan dan volume ruang sangat ekstrem maka dipakai rumus Norris-Eyring. Rumus ini dipakai untuk ruang yang memiliki permukaan dengan bahan berkoefisien serap bunyi sama.

Rumus Norris-Eyring $\rightarrow T_R = 0{,}16V/- \Sigma S.\ln(1- \underline{\alpha})$ dtk.

dengan 0,16 = konstanta
V = volume ruang, m^3.
ΣS = jumlah luas permukaan ruangan, m^2.
$\underline{\alpha}$ = koefisien serapan bunyi rata-rata, $\underline{\alpha} = \Sigma S\alpha / \Sigma S$.

Untuk ruang berbentuk tidak sederhana dan memiliki beragam koefisien serap bunyi pada permukaan-permukaannya maka dipakai rumus Mellington-Sette.

Rumus Mellington-Sette $\rightarrow T_R = 0{,}16V/- \Sigma S_n.\ln(1- \alpha_n)$ dtk.

dengan 0,16 = konstanta
V = volume ruang, m^3.
S_n = permukaan n, m^2.
α_n = koefisien serapan bunyi bahan permukaan n

Catatan: Perlu diingat bahwa rumus-rumus di atas hanya didasarkan serapan bunyi dan luas bidang ruang; tidak mempertimbangkan kenyataan bahwa ada permukaan yang terkena oleh gelombang bunyi banyak dan sedikit. Sebagai contoh, sebuah ruang memiliki permukaan dengan angka serapan bunyi besar tetapi kenyataannya memiliki waktu dengung tinggi. Kasus tersebut dapat terjadi karena permukaan tadi ada di posisi sedemikian rupa sehingga bunyi tidak leluasa mengenainya. Oleh karena itu software akustik yang baik selalu memperhitungkan banyak-sedikitnya permukaan terkena gelombang bunyi.

5.4.6 Tingkat Tekanan Bunyi dalam Ruangan, L_P

$$\mathbf{L_P = L_W - 10\log\Sigma S\alpha + 16\ dB.}$$

dengan L_P = tingkat tekanan bunyi (ruangan), dB
L_W = tingkat daya (sumber) bunyi, dB
$\Sigma S\alpha$ = penyerapan total pada frekuensi bunyi bersangkutan, Sabin.

5.4.7 Pengurangan Kebisingan (*Noise Reduction*), NR, dengan Penambahan Peredam

$$\mathbf{NR = 10\log(a_2/a_1)\ dB.}$$

dengan a_1 = total penyerapan bunyi ruangan pada kondisi peredaman awal, Sabine
a_2 = total penyerapan bunyi ruangan pada kondisi setelah diperbaiki, Sabine.

Untuk memudahkan, biasanya NR suatu bahan merupakan rata-rata untuk frekuensi 250, 500, 1000, 2000 dan 4000 Hz.

5.4.8 Kehilangan Transmisi Komposit (*Composite Transmission Loss*)

$$\mathbf{TL_C = 10\ log\ (\Sigma S/\ \Sigma\tau S)\ dB}$$

Dengan TL_C = kehilangan transmisi komposit, dB
ΣS = luas bidang komposit, m^2
τ = koefisien transmisi bunyi (*sound transmission coefficient*), tanpa unit. (Catatan: τ dapat dicari dari hubungan TL = 10 log $1/\tau$)
$\Sigma\tau S$ = jumlah perkalian koefisien transmisi bunyi dan luas bidang bersangkutan pembentuk komposit ($\Sigma\tau S = \tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \ldots + \tau_n S_n$).

5.4.9 Pengurangan Kebisingan (*Noise Reduction*), NR, Antara Dua Ruang

$$\mathbf{NR = TL - log\ (S/a)\ dB}$$

dengan TL = pengurangan bunyi oleh dinding yang membatasi, dB.
S = luas dinding yang membatasi, m^2.
a = peredaman di ruang penerima bunyi, Sabine (ekivalen dengan m^2 jendela terbuka).

5.4.10 Pengurangan Kebisingan, NR, oleh Penghalang Eksterior

$$NR = 20 \log [(2\pi N)^{0,5}/\tan(2\pi N)^{0,5}] + 5 \text{ dB}$$

dengan
- N = 0,006f.(A+B-d), dB.
- f = frekuensi, Hz.
- A+B = jarak terdekat melewati penghalang (melalui atas atau samping penghalang), m.
- D = jarak lurus antara sumber bunyi dan penerima bunyi, m.

5.5 Contoh-contoh Perhitungan

Sub-bab ini akan memberikan contoh-contoh perhitungan yang biasa digunakan dalam akustik ruangan.

5.5.1 Penggandaan Bunyi

Soal:

Tingkat bunyi sebuah genderang adalah 80 dB. Berapakah tingkat bunyi 100 genderang yang dibunyikan bersama-sama?

Jawab:

L_{I1} = $10 \log (I_1/I_0)$ dB.
80 = $10 \log (I_1/10^{-12})$ dB.
8 = $\log (I_1/10^{-12})$ dB.
$1,0 \times 10^8$ = $(I_1/10^{-12})$ dB.
I_1 = $1,0 \times 10^8 \times 10^{-12}$ dB.
= 10^{-4} W/m^2. → 1 buah genderang

Ingat: Intensitas bunyi (I) memiliki satuan W/m^2, sedang tingkat intensitas bunyi (L_I) memiliki satuan dB.

L_{I2} = $10 \log (I_2/I_0)$ dB.
= $10 \log (100 \times I_1 / I_0)$ dB.
= $10 \log (100 \times 10^{-4} / 10^{-12})$ dB.
= $10 \log 10^{10}$ dB.
= 100 dB. → 100 buah genderang

5.5.2 Menjumlahkan Bunyi

Soal:

Sebuah genderang mempunyai tingkat bunyi 80 dB. Berapa genderang diperlukan untuk bersaing dengan mesin pesawat jet tempur yang sedang tinggal landas dengan tingkat bunyi 130 dB.

Jawab:

Pada Soal 5.5.1 ditemukan bahwa satu buah genderang mempunyai intensitas bunyi = 10^{-4} W/m^2. Dimisalkan diperlukan Y genderang untuk mencapai tingkat bunyi 130 dB, maka:

L_I = $10 \log (I/I_0)$
130 = $10 \log (Y \times 10^{-4} / 10^{-12})$
= $10 \log (Y \times 10^8)$
13 = $\log Y + \log 10^8$
= $\log Y + 8$
$\log Y$ = 5
Y = 100.000 → dibutuhkan 100.000 buah genderang

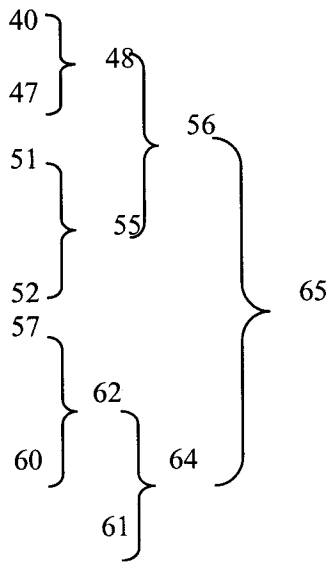
5.5.3 Menjumlahkan Bunyi Tanpa Menghitung

Soal:

Hitunglah tingkat bunyi 7 sumber bunyi yang mempunyai tingkat bunyi masing-masing 40 dB, 47 dB, 51 dB, 52 dB, 57 dB, 60 dB, dan 61 dB tanpa menggunakan rumus logaritma.

Jawab:

Lihat Tabel 5.6, berarti bila selisih tingkat bunyi dua sumber 0 - 1 dB maka ditambahkan 3 dB pada sumber yang bertingkat bunyi lebih besar, 2 - 3 dB ditambahkan 2 dB, 4 - 8dB ditambahkan 1, dan > 9 dB ditambahkan 0 pada tingkat bunyi yang lebih besar. Penjumlahan dapat dilakukan secara bertahap dengan menjumlahkan sumber bunyi dua-dua. Urutan tidak perlu diperhatikan karena hasilnya akan sama.



Jadi tingkat bunyi gabungan 7 sumber bunyi adalah **65 dB**.

5.5.4 Penurunan Tingkat Bunyi oleh Jarak

Soal:

Sebuah sumber bunyi tercatat mempunyai intensitas bunyi = 10^{-2} W/m^2 pada jarak 10 m. Hitunglah tingkat bunyi, L_I, bila jarak digandakan menjadi 20 m.

Jawab:

Intensitas bunyi pada jarak 10m = $I_1 = 10^{-2}$ W/m^2. Menurut teori penggandaan jarak berarti pengurangan intensitas bunyi menjadi seperempatnya. Jadi pada jarak 20 m = $I_2 = 0{,}25 \times 10^{-2}$ W/m^2.

Tingkat bunyi pada jarak 10 m:

$$\begin{aligned} L_{I\,1} &= 10 \log (I_1 / I_0)\ \text{dB}. \\ &= 10 \log (10^{-2} / 10^{-12})\ \text{dB}. \\ &= 10 \log 10^{10}\ \text{dB}. \\ &= \mathbf{100\ dB}. \end{aligned}$$

Tingkat bunyi pada jarak 20 m:

$$\begin{aligned} L_{I\,2} &= 10 \log (I_2 / I_0)\ \text{dB}. \\ &= 10 \log (0{,}25 \times 10^{-2} / 10^{-12})\ \text{dB}. \\ &= 10 \log (25 \times 10^{8})\ \text{dB}. \\ &= 10 (\log 25 + \log 10^{8})\ \text{dB}. \\ &= 10 (1{,}4 + 8)\ \text{dB}. \\ &= \mathbf{94\ dB}. \end{aligned}$$

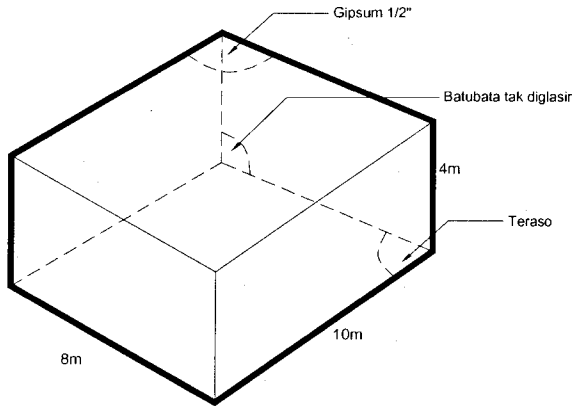
Selanjutnya akan dibuktikan bahwa setiap penggandaan jarak akan menyebabkan intensitas bunyi berkurang seperempatnya dan tingkat bunyi berkurang 6 dB.

5.5.5 Menghitung Waktu Dengung

Soal:

Sebuah ruangan berukuran 8, 10, dan 4 m^3 (lihat Tabel 5.9):

1. Hitung waktu dengung untuk frekuensi 1000 Hz bila bahan dinding batu bata tak diglasir, lantai teraso dan langit-langit gipsum ½"!



***Gambar 5.15** Ruangan dengan atap gipsum dinding tidak diglasir*

2. Hitung waktu dengung untuk frekuensi 1000 Hz bila bahan dinding diganti dengan blok beton kasar, lantai karpet tebal di atas beton, dan langit-langit papan akustik ¼ " digantung 0,5 m!

3. Hitung waktu dengung untuk frekuensi 1000 Hz bila kondisi ruangan seperti soal 1, tetapi dua dinding memanjang (10 m x 4 m) yang berhadapan dibuka!
4. Hitunglah pengurangan kebisingan (*Noise Reduction*, NR) dari kondisi ruangan pada soal 1 ke kondisi pada soal 2!

Jawaban soal 1:

a. Menghitung volume ruang

$V = (10)(8)(4)\ m^3.$
$= \mathbf{320\ m^3.}$

b. Menghitung serapan total permukaan ruangan a ($a = \Sigma\ S.\alpha$)

Elemen	Bahan	Koefisien serapan, α_{1000}	Luas, S (m)	S.α
Langit-langit	Gipsum ½"	0,04	(10x8) = 80	3,2
Dinding	Batu bata tak diglasir	0,04	2(10x4) = 80	3,2
	Batu bata tak diglasir	0,04	2(8x4) = 64	2,56
Lantai	Teraso	0,02	(10x8) = 80	1,6
				10,56

Jadi serapan total permukaan ruangan = **10,56 m^2 Sabin**. Atau, sama dengan serapan 10,56 m^2 jendela terbuka. Ingat bahwa angka tersebut adalah serapan total ruangan untuk frekuensi 1000 Hz.

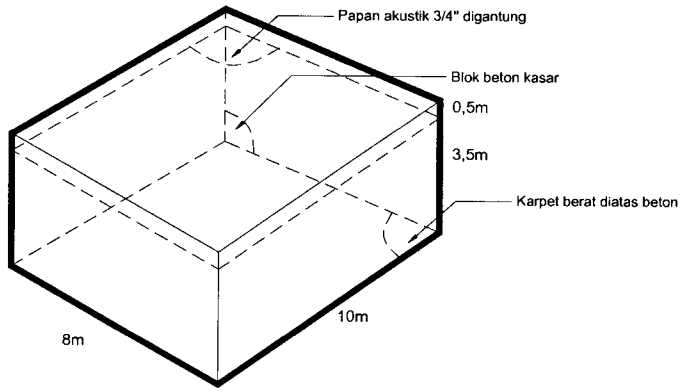
c. Menghitung waktu dengung (T_R)

$T_R = 0{,}16\ V/a$ detik.
$= 0{,}16\ (320/10{,}56)$ detik.
$= 4{,}8 \rightarrow$ waktu dengung = $T_R =$ **4,8 detik.**

Jawaban soal 2:

Penyelesaian melanjutkan dari soal 1:

Menghitung waktu dengung sesuai soal 2, yaitu mengganti permukaan ruangan dengan bahan-bahan penyerap bunyi. Karena papan akustik digantung 0,5 m, maka tinggi dinding ruang menjadi 3,5 m. Volume ruang = $V = 8 \times 10 \times 3{,}5\ m^3 = 280\ m^3$.



***Gambar 5.16** Ruangan dengan atap akustik dan dinding beton kasar*

Elemen	Bahan	Koefisien serap, α_{1000}	Luas, S (m)	S.α
Langit-langit	Papan akustik ¾" digantung	0,99	(10x8) = 80	79,2
Dinding	Blok beton kasar	0,29	2(10x3,5) = 70	20,3
	Blok beton kasar	0,29	2(8x3,5) = 56	16,24
Lantai	Karpet tebal di atas beton	0,37	(10x8) = 80	29,6
				145,34

$T_R = 0{,}16\ V/a$ detik.
$= 0{,}16\ (280/145{,}34)$ detik.
$= \mathbf{0{,}31\ detik.}$

Jawaban soal 3:

Menghitung waktu dengung sesuai soal 3, yaitu dengan kondisi seperti soal 1 namun dinding yang memanjang dibuka penuh.

Elemen	Bahan	Koefisien serap, α_{1000}	Luas, S (m)	S.α
Langit-langit	Gipsum ½"	0,04	(10x8) = 80	3,2
Dinding	(dinding dibuka)	1,0	2(10x4) = 80	80
	Batu bata tak diglasir	0,04	2(8x4) = 64	2,56
Lantai	Teraso	0,02	(10x8) = 80	1,6
				87,36

T_R 0,16 V/a detik.
0,16 (320/87,36) detik.
0,59 dtk.

Jawaban soal 4:

Menghitung pengurangan kebisingan (NR) dari kondisi ruangan soal 1 ke soal 2.

Penyelesaian soal 1 menemukan bahwa a (yaitu $\Sigma S.\alpha$) = 10,56 Sabine. Setelah permukaan ruangan diganti dengan bahan-bahan penyerap bunyi, sesuai soal 2, ditemukan bahwa a = 145,34 Sabine.

Dengan demikian,

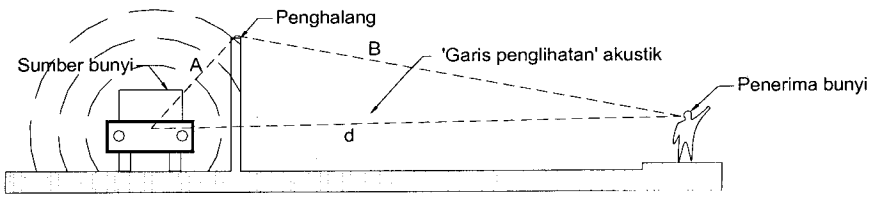
$$\begin{aligned} NR &= 10 \log (a_2 / a_1)\ dB. \\ &= 10 \log (145,34 / 10,56)\ dB. \\ &= 10 \log 14,67\ dB. \\ &= 11,4\ dB. \end{aligned}$$

Jadi penerapan bahan-bahan penyerap bunyi dapat mengurangi tingkat bunyi sekitar **11,4 dB**.

5.5.6 Menghitung Pengurangan Tingkat Bunyi oleh Penghalang

Soal: Sebuah kendaraan melintas dekat dinding (berlaku sebagai penghalang bunyi). Tingkat bunyi yang dikeluarkan oleh knalpot kendaraan tersebut 80 dB. Tinggi dinding dari jalan 3 m. Tinggi knalpot dari jalan 0,5 m. Setelah dihitung ternyata A = 3,2 m, B = 10 m dan d = 11,8 m. Hitunglah tingkat bunyi yang didengar oleh orang yang berada di balik penghalang. Tinggi orang tersebut kira-kira 1,7 m. Hitunglah untuk frekuensi 1000 Hz saja. Kemudian hitunglah bila penghalang ditinggikan hingga 5 m dan bandingkan dengan penghalang 3 m tadi.

Jawab:



***Gambar 5.17** Pengurangan tingkat bunyi oleh penghalang*

Akan digunakan rumus $NR = 20 \log [(2\pi N)^{0,5} / \tan(2\pi N)^{0,5}] + 5$ dB.

a. A = 3,2 m; B = 10 m; d = 11,8 m; f (frekuensi) = 1000 Hz.

$$\begin{aligned} N &= 0,006f(A+B-d) \\ &= 0,006(1000)(3,2+10-11,8) \\ &= 8,4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} NR &= 20 \log [(2\pi N)^{0,5} / \tan(2\pi N)^{0,5}] + 5\ dB. \\ &= 20 \log [(2x3,14x8,4)^{0,5} / \tan(2x3,14x8,4)^{0,5}] + 5\ dB. \\ &= 20 \log [7,26/0,13] + 5\ dB. \\ &= 20 \log 55,85 + 5\ dB. \\ &= 20\ (1,747) + 5\ dB. \\ &= 34,94 + 5\ dB. \\ &= \mathbf{39,94\ dB.} \rightarrow \text{pengurangan kebisingan } 39,94\ dB. \end{aligned}$$

Jadi orang tersebut akan mendengar bunyi kendaraan dengan tingkat bunyi 80 – 39,94 = 40,06 dB.

b. Setelah penghalang ditinggikan menjadi 5 m diperoleh A = 5 m; B = 10,4 m; d = 11,8 m; f (frekuensi) = 1000 Hz

$$\begin{aligned} N &= 0,006f(A+B-d) \\ &= 0,006(1000)(5+10,4-11,8) \\ &= 21,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} NR &= 20 \log [(2\pi N)^{0,5} / \tan(2\pi N)^{0,5}] + 5\ dB. \\ &= 20 \log [(2x3,14x21,6)^{0,5} / \tan(2x3,14x21,6)^{0,5}] + 5\ dB. \\ &= 20 \log [11,65/0,21] + 5\ dB. \\ &= 20 \log 56,3 + 5\ dB. \\ &= 20\ (1,751) + 5\ dB. \\ &= 35,01 + 5\ dB. \\ &= \mathbf{40,01\ dB.} \rightarrow \text{pengurangan kebisingan } 40,01\ dB. \end{aligned}$$

Orang tersebut akan mendengar bunyi kendaraan dengan tingkat bunyi 80 – 40,01 dB = 39,99 dB. Ternyata peninggian penghalang menjadi 5m hanya akan memberikan selisih 0,07 dB. Suatu penurunan yang sangat tidak berarti.

5.5.7 Menghitung Kehilangan Transmisi Dinding

Soal:

Diketahui dinding setengah batu, 115 mm, mempunyai massa 220 kg/m^2.

a. Berapakah Kehilangan Transmisi (*transmission loss*) rata-rata?
b. Berapakah TL untuk frekuensi 125, 250, 1000, dan 4000 Hz?

Jawab:

a. Perhitungan TL_{rata} menggunakan rumus:

$$\begin{aligned} TL_{rata\text{-}rata} &= 18 \log M + 8 \text{ dB} \\ &= 18 \log 220 + 8 \text{ dB} \\ &= 18\,(2{,}34) + 8 \text{ dB} \\ &= \mathbf{50{,}16 \text{ dB.}} \end{aligned}$$

b. Perhitungan TL untuk frekuensi tertentu memakai rumus

$$TL_f = 18 \log M + 12 \log f - 25 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} TL_{125} &= 18 \log 220 + 12 \log 125 - 25 \text{ dB} \\ &= 18\,(2{,}34) + 12\,(2{,}1) - 25 \text{ dB} \\ &= 42{,}12 + 25{,}2 - 25 \text{ dB} \\ &= \mathbf{42{,}32 \text{ dB.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TL_{250} &= 18 \log 220 + 12 \log 250 - 25 \text{ dB} \\ &= 18\,(2{,}34) + 12\,(2{,}4) - 25 \text{ dB} \\ &= 42{,}16 + 28{,}8 - 25 \text{ dB} \\ &= \mathbf{45{,}92 \text{ dB.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TL_{1000} &= 18 \log 220 + 12 \log 1000 - 25 \text{ dB} \\ &= 18\,(2{,}34) + 12\,(3) - 25 \text{ dB} \\ &= 42{,}16 + 36 - 25 \text{ dB} \\ &= \mathbf{53{,}16 \text{ dB.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TL_{4000} &= 18 \log 220 + 12 \log 4000 - 25 \text{ dB} \\ &= 18\,(2{,}34) + 12\,(3{,}6) - 25 \text{ dB} \\ &= 42{,}16 + 43{,}22 - 25 \text{ dB} \\ &= \mathbf{60{,}38 \text{ dB.}} \end{aligned}$$

5.5.8 Menghitung Pengurangan Kebisingan Bunyi oleh Dinding Komposit

Soal:

Diketahui sebuah ruang tertutup dengan satu sisi berupa dinding batu bata berukuran (9m)(3m) dengan jendela kaca setebal 5mm berukuran (4m)(2m). Dimisalkan permukaan ruang yang lain secara imajinatif tidak meneruskan kebisingan sama sekali.

$TL_{batu\ bata} = 42$ dB
$TL_{kaca\ 6mm} = 22$ dB
Kedua TL bahan di atas untuk frekuensi 500Hz.

Berapakah intensitas bunyi sepeda motor (yang berada di sebelah luar dinding) terdengar di dalam ruangan bila diketahui intensitas bunyi sepeda motor tersebut 80 dB.

Jawab:

Untuk menghitung intensitas bunyi sepeda motor dari dalam ruangan perlu dihitung kehilangan transmisi dinding bersangkutan. Karena dinding tersusun dari batu bata dan kaca maka perlu dihitung kehilangan transimisi komposit dengan terlebih dahulu menghitung koefisien bunyi masing-masing bahan.

Batu bata

$$\begin{aligned} TL_{batu\ bata} &= 10 \log 1/\tau_{batu\ bata} \\ 42 &= 10 \log 1/\tau_{batu\ bata} \\ 4{,}2 &= \log 1/\tau_{batu\ bata} \\ 1/\tau_{batu\ bata} &= 10^{4,2} \\ \tau_{batu\ bata} &= 10^{-4,2} \\ &= 0{,}000063 \end{aligned}$$

Kaca

$$\begin{aligned} TL_{kaca} &= 10 \log 1/\tau_{kaca} \\ 22 &= 10 \log 1/\tau_{kaca} \\ 2{,}2 &= \log 1/\tau_{kaca} \\ 1/\tau_{kaca} &= 10^{2,2} \\ \tau_{kaca} &= 10^{-2,2} \\ &= 0{,}006 \end{aligned}$$

Luas bidang dinding (ΣS) = 9m x 3m = 27 m^2.

Luas kaca (S_{kaca}) = 4m x 2m = 8 m^2.

Luas batu bata ($S_{batu\ bata}$) = (27 – 8) m^2 = 19 m^2.

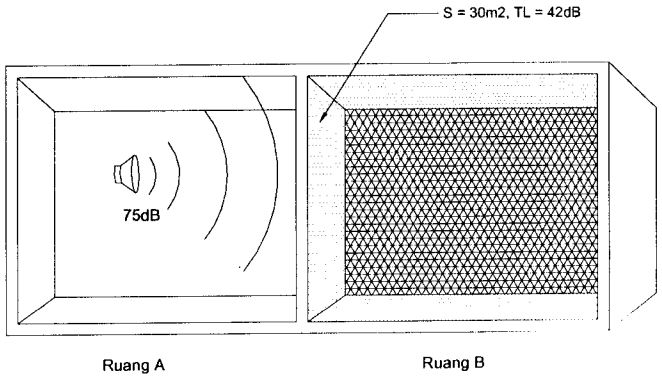
$$TL_C = 10 \log (\Sigma S_{komposit} / \Sigma \tau S)\ dB$$
$$= 10 \log 27/(S_{kaca} x\ \tau_{kaca} + S_{batu\ bata} x\ \tau_{batu\ bata})$$
$$= 10 \log 27/(8x0{,}006 + 19x0{,}00006)$$
$$= 10 \log 27/(0{,}048 + 0{,}00114)$$
$$= 10 \log 27/0{,}04914)$$
$$= 10 \log 549{,}45$$
$$= 27{,}18\ dB$$

Dengan demikian dari dalam ruangan bunyi sepeda motor terdengar dengan intensitas = 80 dB – 27,18 dB = **52,82 dB**.

5.5.9 Menghitung Tingkat Bunyi di Suatu Ruang oleh Sumber Bunyi di Ruang Lain

Soal:

Diketahui tingkat bunyi sumber suara di ruang A = 75 dB. Ruang B mempunyai peredaman total (a) = 200 Sabine. Sedangkan kehilangan transmisi (TL) dinding antara ruang A dan B = 42 dB. Luas dinding batas antara A dan B, yaitu S = 30 m^2. Hitunglah pengurangan bunyi, NR, oleh dinding dan berapa tingkat bunyi sumber tadi yang terdengar di ruang B?



***Gambar 5.18** Tingkat bunyi di suatu ruangan oleh sumber bunyi di ruangan lain*

Jawab:

Digunakan rumus NR = TL – log (S/a) dB
= 42 – log (30/200) dB
= 42 – log 0,15 dB
= 42 – (-0,82) dB
= **42,82 dB.** → pengurangan bunyi 42,82 dB.

Jadi tingkat bunyi sumber suara di A dapat terdengar di B dengan tingkat bunyi = 75 – 42,82 dB
= **32,18 dB.**

5.5.10 Menghitung Tingkat Kebisingan Suatu Ruangan Oleh Sebuah Sumber Bunyi

Soal:

Sebuah sumber bunyi bertingkat daya bunyi (L_W) = 70dB diletakkan di dalam ruangan dengan total serapan permukaannya untuk frekuensi tertentu (a atau $\Sigma S.\alpha$) = 200 Sabine.

1. Berapa tingkat tekanan bunyi (L_P) ruangan tersebut?
2. Bila total serapan dikurangi, misalnya dengan menambah bahan pemantul bunyi, menjadi 100 Sabine, berapakah L_P?
3. Kemudian bila total serapan ditingkatkan, dengan menambah bidang penyerap bunyi, hingga 300 Sabine, berapakah L_P?

Jawab:

Akan digunakan rumus $L_P = L_W - 10\log\Sigma S\alpha + 16$ dB

1. untuk a = 200 Sabine maka
$L_P = 70 - 10\log200 + 16$ dB
$= 70 - 10\ (2{,}3) + 16$ dB
$= 70 - 23 + 16$ dB
$=$ **63 dB.**

2. untuk a = 100 Sabine maka
$L_P = 70 - 10\log100 + 16$ dB.
$= 70 - 20 + 16$ dB.
$=$ **66 dB.**

3. untuk a = 300 Sabine maka $L_P = 70 - 10\log 300 + 16$ dB.
$= 70 - 10(2,5) + 16$ dB.
$=$ **61 dB.**

Jadi, dari perbandingan di atas terlihat bahwa sebuah sumber bunyi dengan kekuatan sama dapat menyebabkan kebisingan yang berbeda-beda bila bahan permukaan ruangan tersebut diganti-ganti dengan bahan yang mem-punyai koefisien serapan berbeda-beda sehingga semakin banyak bidang pantul, ruangan akan semakin bising. Ingat bahwa perhitungan di atas adalah untuk satu frekuensi tertentu. Setiap bahan akan mempunyai karakter ber-beda terhadap frekuensi bunyi. Ada yang menyerap banyak frekuensi tinggi, ada yang rendah dan ada yang menyerap frekuensi tinggi dan rendah. Jadi sangat mungkin suatu ruangan bising untuk frekuensi bunyi tinggi, tetapi tidak bising untuk frekuensi rendah.

***Tabel 5.12** Koefisien serapan bunyi*

	MATERIAL	Koefisien Serapan Bunyi						NRC
		125	250	500	1000	2000	4000	
	DINDING							
	Pemantul Bunyi							
1	Batu bata, tak diglasir	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05
2	Batu bata, tak diglasir, dicat	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,00
3	Beton, kasar	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,05
4	Blok beton, dicat	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,05
5	Kaca, berat, (lebar)	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05
6	Kaca, jendela biasa	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,15
7	Papan gipsum, tebal ½" (dipaku pada rangka 2/4, setiap jarak 16" as)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,05
8	Papan gipsum, 1 lapis, tebal 5/8" (disekrup ke rangka 1/3, setiap jarak 16", rongga diisi bahan isolator berserat)	0,55	0,14	0,08	0,04	0,12	0,11	0,10
9	Konstruksi No. 8 dengan 2 lapis papan gipsum tebal 5/8"	0,28	0,12	0,10	0,07	0,13	0,09	0,10
10	Marmer atau keping berglasir	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00
11	Plester pada batu bata	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
12	Plester pada blok beton (atau 1" pada papan)	0,12	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04	0,05
13	Plester pada papan	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03	0,05
14	Plywood tebal 3/8"	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,15
15	Baja	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02	0,10

	MATERIAL	Koefisien Serapan Bunyi						NRC
		125	250	500	1000	2000	4000	
16	Kerei logam (metal)	0,06	0,05	0,07	0,15	0,13	0,17	0,10
17	Kayu, tebal ¼", dengan rongga udara di belakangnya	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06	0,10
18	Kayu, tebal 1", dengan rongga udara di belakangnya	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,10
	Penyerap Bunyi							
19	Blok beton, kasar	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	0,35
20	Tirai (korden) ringan, 0,34 kg/m^2, rata pada dinding (Catatan: Memantulkan sebagian besar frekuensi)	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	0,15
21	Tirai sedang, 0, 48 kg/m^2 (dilipat-lipat hingga setengah area, dengan demikian 2m tirai sama dengan 1m dinding.)	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60	0,55
22	Tirai berat, 0,6 kg/m^2, dilipat-lipat hingga setengahnya	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	0,60
23	Tirai tenunan serat kaca, 0,3 kg/m^2, dilipat-lipat hingga setengahnya (Catatan: Semakin dalam rongga udara di belakang-ya, hingga 12", penyerapan frekuensi rendah akan semakin besar	0,09	0,32	0,68	0,83	0,39	0,76	0,55
24	Papan serat tatal kayu, tebal 1" pada beton	0,15	0,26	0,62	0,94	0,64	0,92	0,60
25	Material berserat tebal dibelakang bidang terbuka	0,60	0,75	0,82	0,80	0,60	0,38	0,75
26	Karpet berat pada papan berserat mineral, ber-lubang-lubang, dengan rongga udara di belakangnya	0,37	0,41	0,63	0,85	0,96	0,92	0,70
27	Panel kayu, tebal ½", berlubang-lubang dengan diameter 3/16", 11% luasan terbuka, dengan serat kaca setebal 2 ½" yang mengisi rongga udara di belakangnya	0,40	0,90	0,80	0,50	0,40	0,30	0,65

	MATERIAL	Koefisien Serapan Bunyi						NRC
		125	250	500	1000	2000	4000	
	LANTAI							
	Pemantul bunyi							
28	Beton atau teraso	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
29	Linoleum, karet, atau lembaran aspal di atas beton	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,05
30	Marmer atau keping diglasir	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00
31	Kayu	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,10
32	Parket kayu di atas beton	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,05
	Penyerap bunyi							
33	Karpet berat di atas beton	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65	0,30
34	Karpet berat di atas karet busa	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,55
35	Karpet berat, di atas lateks takberpori, di atas karet busa	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63	0,35
36	Karpet ruang dalam-ruang luar	0,01	0,05	0,10	0,20	0,45	0,65	0,20
	LANGIT-LANGIT							
	Pemantul bunyi							
37	Beton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
38	Papan gipsum, setebal ½"	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,05
39	Papan gipsum, setebal ½", digantung	0,15	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,05
40	Plester pada bilah papan	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03	0,05
41	Plywood, tebal 3/8"	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,15
	Penyerap bunyi							
42	Papan akustik, tebal ¾", digantung	0,76	0,93	0,83	0,99	0,99	0,94	0,95
43	Papan serat tatal kayu, tebal 2" pada rangka yang diletakkan	0,59	0,51	0,53	0,73	0,88	0,74	0,65
44	Material penyerap bunyi berpori, tipis, tebal ¾"	0,10	0,60	0,80	0,82	0,78	0,60	0,75
45	Material penyerap bunyi berpori, tebal, 2", atau material tipis tetapi dengan rongga udara di belakangnya	0,38	0,60	0,78	0,80	0,78	0,70	0,75
46	Serat selulosa yang disemprotkan, tebal 1" pada beton	0,08	0,29	0,75	0,98	0,93	0,76	0,75
47	Tenunan atap serat kaca, 0,4 kg/m^2	0,65	0,71	0,82	0,86	0,76	0,62	0,80

	MATERIAL	Koefisien Serapan Bunyi						NRC
		125	250	500	1000	2000	4000	
48	Tenunan atap serat kaca, 1,25 kg/m^2 (Catatan: Memantulkan bunyi pada kebanyakan frekuensi)	0,38	0,23	0,17	0,15	0,09	0,06	0,15
49	Busa Polyurethane, tebal 1", sel terbuka	0,07	0,11	0,20	0,32	0,60	0,85	0,30
50	Panel-panel papan serat kaca sejajar, setebal 1", selebar 18", panjang bebas, berjarak 18" satu dengan yang lain, tergantung 12" di bawah langit-langit	0,07	0,20	0,40	0,52	0,60	0,67	0,45
51	Panel-panel papan serat kaca sejajar, setebal 1", selebar 18", panjang bebas, berjarak 6 ½" satu dengan yang lain, tergantung 12" di bawah langit-langit	0,10	0,29	0,62	0,72	0,83	0,88	0,85
52	Kursi yang terbungkus kain dengan baik, penahan tempat duduk berlubang-lubang, tidak diduduki	0,19	0,37	0,56	0,67	0,61	0,59	
53	Kursi yang terbungkus dengan kulit, tidak diduduki	0,44	0,54	0,60	0,62	0,58	0,50	
54	Audiens, duduk di kursi yang terbungkus	0,39	0,57	0,80	0,94	0,92	0,87	
55	Jemaat, duduk di bangku kayu	0,57	0,61	0,75	0,86	0,91	0,86	
56	Kursi, metal atau kayu, tidak diduduki	0,15	0,19	0,22	0,39	0,38	0,30	
57	Siswa, berpakaian tidak formal, duduk di kursi dengan tempat menulis di samping	0,30	0,41	0,49	0,84	0,87	0,84	
	BUKAAN							
58	Balkon dalam, dengan kursi yang terbungkus			0,50-1,00				
59	Difuser atau gril, sistem mekanik			0,15-0,50				
60	Panggung			0,25-0,75				
	LAIN-LAIN							
61	Kerakal, pisah pisah dan lembab, tebal 4"	0,25	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,70

	MATERIAL	Koefisien Serapan Bunyi						NRC
		125	250	500	1000	2000	4000	
62	Rumput, *marion bluegrass*, setinggi 2"	0,11	0,26	0,60	0,69	0,92	0,99	0,60
63	Salju, baru turun, tebal 4"	0,45	0,75	0,90	0,95	0,95	0,95	0,90
64	Tanah, kasar	0,15	0,25	0,40	0,55	0,60	0,60	0,45
65	Pohon, cemara balsam, 20ft^2 per pohon, setinggi 8'	0,03	0,06	0,11	0,17	0,27	0,31	0,15
66	Permukaan air (kolam renang)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,00

Sumber: Egan, 1988.

Catatan: NRC (*Noise Reduction Coefficient*) adalah koefisien serapan bunyi suatu material yang diambil rata-rata dari **250 – 2000** Hz. Oleh karena itu penggunaannya harus hati-hati.

***Tabel 5.13** Kehilangan transmisi*

	MATERIAL	Kehilangan Transmisi (dB)						STC
		125	250	500	1000	2000	4000	
	DINDING							
	Monolitik							
1	Plywood tebal 3/8" (4,89 kg/m^2)	14	18	22	20	21	26	22
2	Logam lembaran ukuran 26	12	14	15	21	21	25	20
3	Papan gipsum ½"	15	20	25	31	33	27	28
4	2 lapis papan gipsum ½", dilaminasi	19	26	30	32	29	37	31
5	Timah lembaran tebal 1/32"	15	21	27	33	39	45	31
6	Anyaman atap serat kaca	6	9	11	16	20	25	16
	Interior							
7	Rangka kayu 2/4, jarak 16" as, ditutup papan gipsum setebal ½" di kedua sisinya	17	31	33	40	38	36	33
8	Seperti konstruksi no.7 dengan rongga diisi serat kaca 2"	15	30	34	44	46	41	37
9	Rangka kayu 2/4 ganda, masing-masing berjarak 16" as, ditutup papan gipsum setebal ½" di kedua sisinya	23	28	39	46	54	44	39
10	Seperti konstruksi no.9, rongga diisi serat kaca setebal 2 ¼"	29	38	45	52	58	50	48

	MATERIAL	Kehilangan Transmisi (dB)						STC
		125	250	500	1000	2000	4000	
11	Rangka kayu 2/4, berjarak 16" as, masing-masing sisi ditutup papan gipsum setebal 5/8", salah satu sisi disekrup ke dudukan yang lentur, rongga diisi serat kaca 3"	32	42	52	58	53	54	52
12	Deretan ganda rangka kayu 2/4, berjarak 16" as, ditutup papan gipsum setebal 3/8" pada kedua sisinya, rongga diisi serat kaca 9"	31	44	55	62	67	65	54
13	Blok beton padat setebal 6", 3 sel, dicat	37	36	42	49	55	48	45
14	Blok beton ringan setebal 8", 3 sel, dicat	34	40	44	49	59	64	49
15	Seperti konstruksi no.14 dengan mineral lepas-lepas diisikan pada sel-sel.	34	40	46	52	60	66	51
16	Blok beton ringan setebal 6", dengan papan gipsum setebal ½" yang ditempelkan di salah satu sisi dengan dudukan lentur, sisi yang lain dicat	35	42	50	64	67	65	53
17	Rangka kanal baja 2 ½", berjarak 24" as, kedua sisi ditutup papan gipsum 5/8"	22	27	43	47	37	46	39
18	Seperti konstruksi No.17 dengan rongga diisi serat kaca 2"	26	41	52	54	45	51	45
19	Rangka kanal baja 3 5/8", berjarak 16" as, kedua sisi ditutup dengan papan gipsum ½"	26	36	43	51	48	43	43
20	Seperti konstruksi No.19 dengan rongga diisi serat mineral 3"	28	45	54	55	47	54	48
21	Rangka kanal baja 2 ½", berjarak 24" as, satu sisi ditutup 2 lapis papan gipsum 5/8", sisi yang lain 1 lapis	28	31	46	51	53	47	44
22	Seperti konstruksi No.21 dengan rongga diisi serat kaca 2"	31	43	55	58	61	51	51

	MATERIAL	Kehilangan Transmisi (dB)						STC
		125	250	500	1000	2000	4000	
23	Rangka kanal baja 3 5/8", berjarak 24" as, kedua sisi ditutup masing-masing dua lapis papan gipsum 5/8"	34	41	51	54	46	52	48
24	Seperti konstruksi No.23, rongga diisi serat mineral 3"	38	52	59	60	56	62	57
	Eksterior							
25	Batu bata ekspos 4 ½"	32	34	40	47	55	61	45
26	Dua lapis batu bata ekspos 4 ½", dengan rongga 2", kedua lapis bata diikat dengan pengikat logam	37	37	47	55	65	67	50
27	Dua lapis batu bata 4 ½", diplester, dengan rongga 2" yang diisi serat kaca	43	50	52	61	73	78	59
28	Rangka kayu 2/4, berjarak 16" as, sisi luar ditutup stucco 1" yang dipasang pada kerangka logam, sisi dalam ditutup papan gipsum ½"	21	33	41	46	47	51	42
29	Beton padat tebal 6", kedua sisi diplester masing-masing setebal ½"	39	42	50	58	64	67	53
	LANTAI - LANGIT –LANGIT							
30	Balok kayu 2/10, berjarak 16" as, di atas balok tersusun plywood ½", di atas plywood terletak kayu oak setebal 25/32", di bawah balok dipaku-kan papan gipsum 5/8"	23	32	36	45	49	56	37
31	Seperti konstruksi No. 30 dengan papan gipsumnya disekrup pada dudukan kanal lentur	30	35	44	50	54	60	47
32	Seperti konstruksi No. 31, rongga diisi serat kaca 3"	36	40	45	52	58	64	49
33	Slep (*slab*) beton bertulang 4"	48	42	45	56	57	66	44
34	Beton pracetak T 14" dengan lapisan atas beton setebal 2" di atas slep beton 2"	39	45	50	52	60	68	54
35	Slep beton bertulang 6"	38	43	52	59	67	72	66

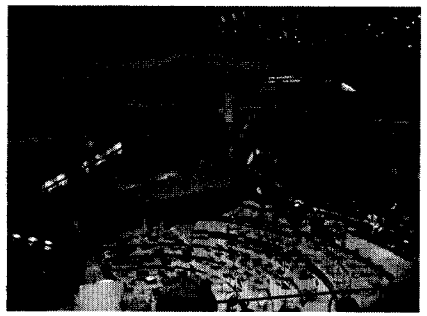
	MATERIAL	Kehilangan Transmisi (dB)						STC
		125	250	500	1000	2000	4000	
36	Slep beton bertulang 6", dengan lapisan di atasnya (mulai dari beton) serat kaca 1", rangka kayu 1 ½ / 2, lantai kayu T&G ¾"	38	44	52	55	60	65	55
37	Balok baja 18", berjarak 16", di atasnya tersusun (mulai dari balok baja) papan, karpet berat, pywoof 5/8", beton 1 5/5", sedangkan di bawah baja tergantung papan gipsum 5/8"	27	37	45	54	60	65	47
38	Balok kayu 3/8, berjarak 32" as, papan T&G 2/6", aspal, penutup krikil	29	33	37	44	55	63	41
39	Seperti no.38, dengan balok kayu 2/4, berjarak 16" as, sisi langit-langit ditutup dengan papan gipsum ½" yang digantung pada kanal lentur, rongga diisi serat kaca 4"	35	42	49	62	67	79	53
40	Baja gelombang, ukuran 24, disemprot selulose bawahnya setebal 1 3/8"	17	22	26	30	35	41	10
41	Baja gelombang ukuran 28, ditopang batang baja sedalam 14", di atasnya dilapis beton krikil dan pasir setebal 2 ½", disisi bawah ditutup plesteran gipsum ½" pada lembaran logam yang ditopang rangka besi kanal berjarak 13 ½" as	32	46	45	50	57	61	49
	PINTU							
42	Pintu krepyak, terbuka 25-30%	10	12	12	12	12	11	12
43	Pintu kayu berongga 1 ¾", tanpa gasket, rongga dengan kosen ¼"	14	19	23	18	17	21	19
44	Seperti konstruksi No. 43, dengan gasket dan penutup celah bawah antara pintu dan lantai	19	22	25	19	20	29	21

	MATERIAL	Kehilangan Transmisi (dB)						STC
		125	250	500	1000	2000	4000	
45	Pintu kayu padat 1 ¾", dengan gasket dan penutup celah bawah antara pintu dan lantai	29	31	31	31	39	43	34
46	Pintu baja ukuran 16, berongga 1 ¾", diisi serat kaca, dengan gasket dan penutup celah bawah	23	28	36	41	39	44	38
	KACA							
47	Kaca float monolitik 1/8"	18	21	26	31	33	22	26
48	Kaca float monolitik ¼"	25	28	31	34	30	37	31
49	Kaca berinsulasi ½": kaca dobel 1/8" + 1/8" dengan rongga udara ¼"	21	26	24	33	44	34	28
50	Kaca dobel ¼" + 1/8" dengan rongga udara 2"	18	31	35	42	44	44	39
51	Seperti konstruksi No. 50 dengan rongga udara 4"	21	32	42	48	48	44	43
52	Kaca dilaminasi ¼" dengan lapisan plastik di tengah 30 milli	25	28	32	35	36	43	35
53	Kaca dobel: kaca dilaminasi ¼" + kaca monolitik 3/16", dengan rongga udara 2"	25	34	44	47	48	55	45
54	Kaca dobel: kaca dilaminasi ¼" + kaca monolitik 3/16", dengan rongga udara 4"	36	37	48	51	50	58	48
55	Kaca dobel: kaca dilaminasi ¼" + kaca dilaminasi ¼", dengan rongga udara ½"	21	30	40	44	46	57	42

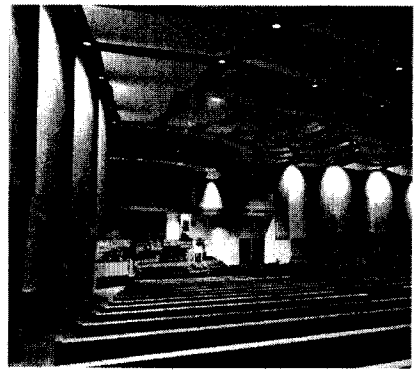
Sumber: Egan, 1988

5.6 Galeri

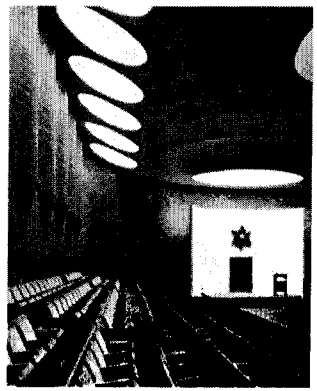
Sub-bab ini memberikan contoh interior yang dirancang dengan pertimbangan akustik.



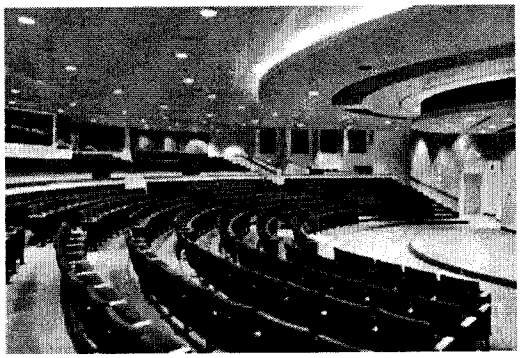
Gambar 5.19 *Philharmonic Concer Hall, Berlin*



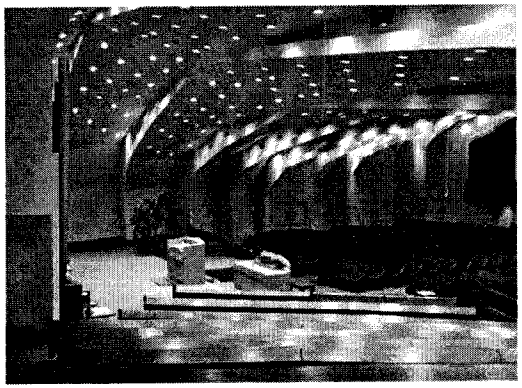
Gambar 5.20 *Faith Chapel of Billing, MT*
(http://www.allchurchsound.com/ACS/archacousticspics/)



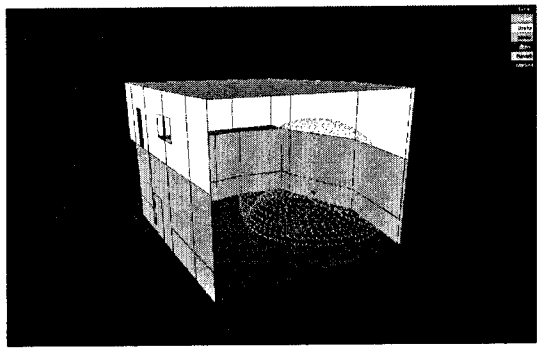
Gambar 5.21 *Congregation Beth Torah*
(http://www.allchurchsound.com/ACS/archacousticspics/)



Gambar 5.22 *Colonial Hall*
(http://www.stewartacousticalconsultants.com/books.html)



Gambar 5.23 *New York Presbyterian Churh*
http://www.hansenacoustics.com/wsn4777.html



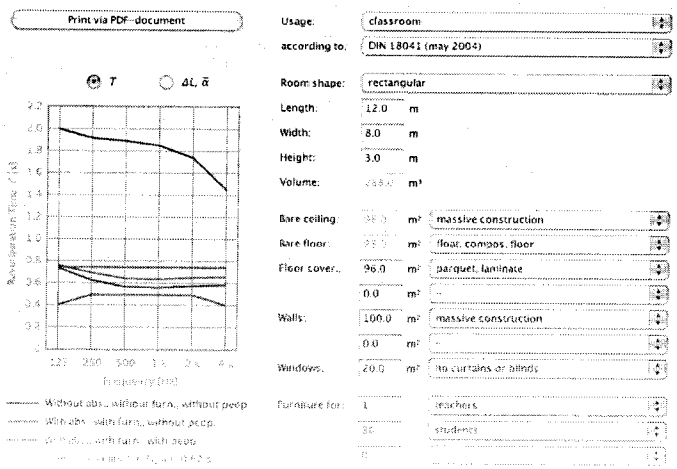
Gambar 5.24 *Studi akustik studio dengan ECOTECT 5.5 (Satwiko, 2007)*

5.7 Alamat Internet

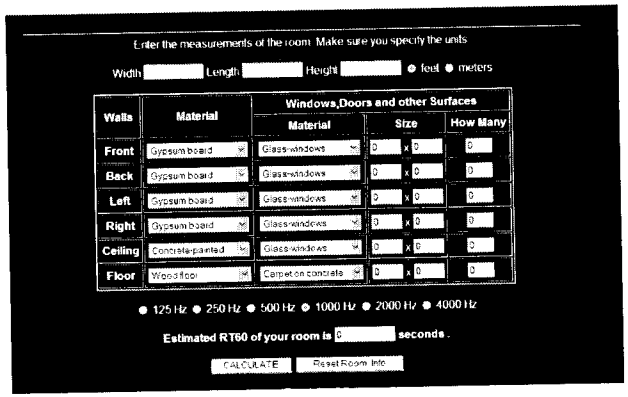
Di bawah ini beberapa alamat *website* yang menyediakan informasi tentang akustik.

http://asa.aip.org/jasa.html; jalan masuk ke The Journal of the Acoustical Society of America-Online.
http://www.acousticalsolutions.com/education/glossary.asp; istilah dalam akustik
http://www.acousticalsolutions.com/education/index.asp ; dasar-dasar akustik
http://www.acousticalsurfaces.com/related_links/links.htm; bahan-bahan akustik
http://www.catt.se/; menyediakan program akustik untuk arsitektur yang cukup lengkap dan canggih. Versi demonya dapat di-*download*.
http://www.sciencedirect.com/science/journal/0003682X; jalan masuk ke jurnal internasional Applied Acoustics yang menyajikan hasil-hasil penelitian akustik.
http://www.vibrationdata.com/; program akustik umum, dapat dipergunakan secara *on-line*.

5.8 Software



Gambar 5.25 *Room Acoustics Calculator (online)*
(http://www.huneeke.de/en/calculators/room-acoustics.html)



Gambar 5.26 *Contoh kalkulator akustik yang banyak ditemui di internet (http://www.trinitysoundcompany.com/rt60.html)*

BAB 6
AKUSTIKA BUATAN

Sejak zaman dahulu kala akustik telah menjadi bagian penting arsitektur. Nenek moyang manusia menjadikan suara sebagai bagian penting peradaban dan kebudayaan mereka yang tidak hanya digunakan untuk komunikasi saja namun juga untuk kesenangan. Ketika kegiatan mendengarkan pidato dan pertunjukan seni musik dilakukan secara khusus maka dirasakanlah kebutuhan akan tempat-tempat (bangunan-bangunan) yang secara khusus pula dipersiapkan untuk itu. Arsitek pada masa itu sudah sangat sadar bahwa desain bangunan berpengaruh pada kualitas bunyi di dalamnya sehingga juga akan menentukan kenikmatan dari mendengar bunyi tadi. Tentu saja ketika itu belum ditemukan sistem bunyi elektronik (*electronic sound system*) sehingga mereka seutuhnya bersandar pada desain bangunan dan material untuk memperoleh kualitas bunyi yang diinginkan. Percaya atau tidak, para ahli akustik modern pun masih menyarankan bahwa bila kita ingin memperoleh kualitas akustik bangunan yang bagus, kita harus mulai dari menata desain bangunan itu dulu. Peralatan elektronik akan menjadi penyokong yang baik.

Namun, dalam perkembangan zaman, manusia merasakan kebutuhan akan alat yang dapat mempermudah mereka memperoleh kualitas dan kuantitas bunyi yang sesuai dengan yang mereka inginkan. Ketika di dalam ruangan menjadi gaduh, manusia memikirkan bagaimana mereka dapat memperkeras suara mereka untuk mengatasi kegaduhan tadi. Maka lahirlah pengeras suara (*loudspeaker*) yang dapat memperkeras suara manusia dan bunyi musik. Manusia juga berhasil menciptakan berbagai alat musik elektronik yang tidak saja lebih keras namun juga lebih bervariasi bunyinya. Sejak saat itu peralatan tata suara elektronik menjadi bagian penting dari akustik bangunan. Itu menjadi penegasan bahwa jika kita bicara tentang *sound system*, ingat bahwa kata *system* itu bermakna antara peralatan elektronik dan akustik bangunan adalah satu kesatuan. Secanggih dan semahal apa pun peralatan tata suara elektronik yang dipasang di suatu bangunan, bila akustik bangunan tersebut buruk maka hal itu akan menjadi-

kan kualitas bunyi dalam bangunan itu buruk juga. Sebaliknya, akustik bangunan yang bagus bisa dirusak oleh sistem tata suara elektronik yang buruk.

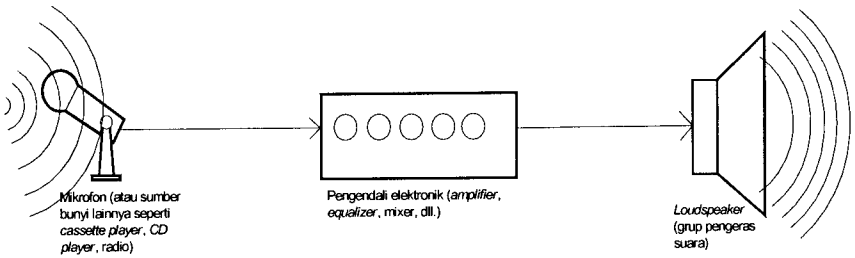
Pada Bab 5 telah diuraikan panjang lebar cara mengatur Waktu Dengung (*Reverberation Time*) dan Kehilangan Transmisi (*Transmission Loss*, isolasi bunyi) agar akustik ruangan sesuai dengan yang dikehendaki. Dua hal tersebut memang menjadi inti dari akustik bangunan. Pada Bab 6 ini penekanan lebih pada peralatan tata suara elektronik dan detail arsitekturalnya.

6.1 Istilah-istilah dan Pengertian dalam Akustik

Sub-bab ini akan memberikan ringkasan pengertian dalam akustik, khususnya yang sering dijumpai ketika kita membahas tentang sistem bunyi elektronik. Pengertian-perngertian dasar telah pula disebutkan pada Bab 5. Jika memerlukan penjelasan mengenai istilah yang tidak terdapat pada sub-bab ini, kunjungilah situs Internet, antara lain:

`http://www.stirlingaudioservices.com/gloss.htm`

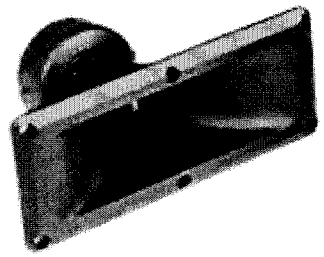
Sistem bunyi elektronik (*electronic sound system*) pada awalnya dimaksudkan untuk memperkuat bunyi asli. Komponen sistem bunyi elektronik dasar tersebut terdiri atas: **mikrofon** (*microphone*) yang bertugas untuk mengubah gelombang bunyi (energi bunyi) menjadi sinyal listrik, **penguat** (*amplifier*) yang bertugas untuk memperkuat sinyal listrik dari mikrofon tadi, dan ***loudspeaker*** (pengeras suara / pelantang) yang mengubah sinyal listrik yang telah diperkuat menjadi gelombang bunyi yang lebih keras daripada bunyi asli.



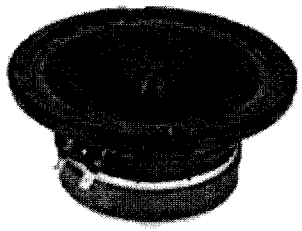
Gambar 6.1 *Dasar sistem bunyi elektronik*

Kita tahu bahwa bunyi adalah getaran berentang 20 - 20 kHz. Ternyata jika bunyi seluruh rentang tadi direproduksi oleh *loudspeaker* tunggal, tidaklah diperoleh hasil yang bagus. Oleh karena itu rentang tadi dibagi

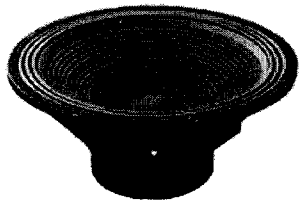
menjadi 3 bagian oleh alat bernama ***cross-over*** untuk didistribusikan ke *loudspeaker* yang berbeda-beda. Bunyi **nada tinggi** (2.000 – 20.000 Hz, *treble*) akan dikeluarkan melalui ***hi-range speaker*** (*high-frequency horn loudspeaker, tweeter*), **nada tengah** (500 – 2.000 Hz) akan dikeluarkan oleh ***mid-range speaker*** (*medium-frequency loudspeaker*), dan **nada rendah** (150 – 500 Hz, *bass*) akan dikeluarkan oleh ***low-range speaker*** (*low-frequency loudspeaker, woofer*). Kadang-kadang nada rendah lebih disukai kalau keluar dengan mantap bertenaga melalui *low-range speaker* terpisah yang dikenal sebagai ***sub-woofer*** (20 – 150 Hz).



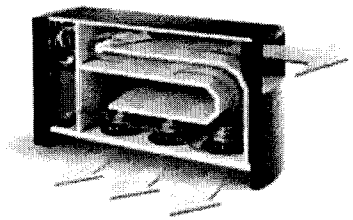
Gambar 6.2 *Tweeter Piezo (2,6"x2,6") yang memiliki respons frekuensi dari 1,8kHz hingga 30 kHz.*
(`http://www.usspeaker.com/homepage.htm`)



Gambar 6.3 *Mid-range speaker Beyma (6,5" 8 Ohm) memiliki respons frekuensi 150 Hz hingga 8kHz.*
(`http://www.usspeaker.com/homepage.htm`)

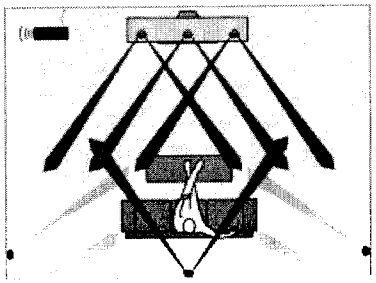


Gambar 6.4 *Woofer Beyma (21") memiliki respons frekuensi 25Hz hingga 1kHz.*
(`http://www.usspeaker.com/homepage.htm`)



***Gambar 6.5** Subwoofer buatan Bose (www.bose.com).*

Pada sistem bunyi elektronik awal, seluruh bunyi yang masuk melalui mikrofon direproduksi campur menjadi satu yang dikenal dengan istilah **mono**. Betapa pun kompleksnya sumber bunyi (paduan suara, orkes, dll.), bunyi reproduksi dikeluarkan menjadi satu sehingga bunyi yang aslinya datang dari banyak titik menjadi seolah-olah dari satu titik saja. Hal ini tidak memuaskan orang. Lalu orang ingat bahwa manusia mempunyai dua telinga, di sisi kiri dan kanan kepala. Kedua telinga ini bermanfaat untuk menangkap bunyi dari segala arah yang kemudian diolah oleh otak menjadi kesan ruang untuk menentukan orientasi. Efek tersebut dimanfaatkan dengan teknologi **sistem bunyi stereo** (*stereo sound system*) yang memiliki saluran untuk *loudspeaker* kiri dan kanan. Kedua *speaker* tadi mengeluarkan bunyi yang agak berbeda sehingga menimbulkan efek meruang. Manusia semakin rewel lagi, mereka tidak puas dengan bunyi yang hanya datang dari depan, karena dalam kondisi alami bunyi datang dari segala arah. Mendengarkan reproduksi musik band dari sepasang *speaker* di depan memang tidak masalah karena umumnya memang kita menonton band di depan kita. Namun, untuk bunyi film tentu diperlukan sistem bunyi elektronik yang dapat mereproduksi bunyi dari segala arah. Efek tersebut dikenal dengan **efek mengelilingi** (*surround effect*) yang dapat terdiri atas 7 *speaker* (2 *speaker* di depan, 2 *speaker* di samping, 2 *speaker* di belakang dan 1 *sub-woofer*).



***Gambar 6.6** Surround effect (www.bose.com)*

Fasilitas lain yang biasanya menyertai sistem bunyi elektronik adalah:

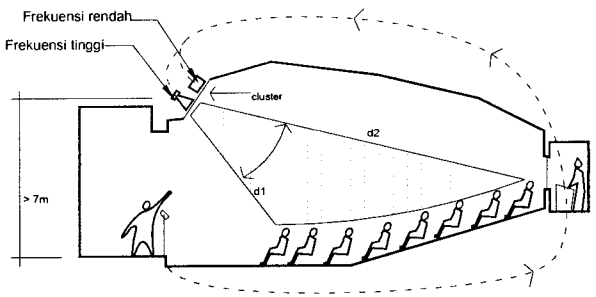
- **Radio** (*tunner*)
- **Pemutar kaset** (*casstte player*)
- **Pemutar CD** (*Compact Disk Player*);
- **Pemutar VCD/DVD** (*Video Compact Disk/Digital Video Disk Player*) (Catatan: DVD juga sering disebut *Digital Versatile Disk*).
- ***Equalizer*** adalah fasilitas untuk mengatur kekuatan bunyi berdasarkan frekuensinya. Dengan alat tersebut kita dapat, misalnya, mengurangi intensitas nada rendah dan menambah intensitas nada tinggi. Atau menguatkan nada tengah dan melemahkan nada tinggi dan rendah agar kita dapat mendengarkan suara penyanyi dengan lebih jelas.
- ***Synthesizer*** berguna untuk mengubah warna bunyi atau meniru bunyi-bunyian.
- ***Mixer*** adalah alat untuk mencampur dan mengatur lalu-lintas sumber bunyi pada sistem bunyi elektronik. Dengan alat ini kita bisa memadukan beberapa sumber bunyi sekaligus dan mengatur kekuatan masing-masing sehingga diperoleh ramuan bunyi yang sesuai dengan keinginan.

Pada sistem yang kuno dapat ditemukan **Pemutar Piringan Hitam** (*Phonograph player*).

Ada beberapa tipe penempatan *loudspeaker* pada sistem bunyi elektronik, namun pada dasarnya ada 4 tipe:

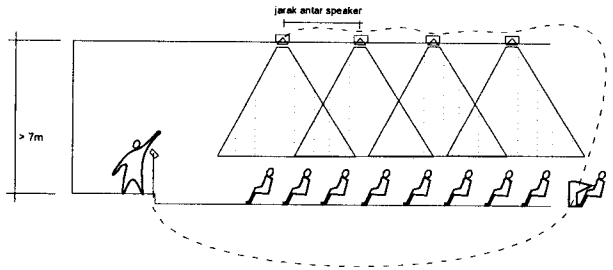
- **Terpusat** (*central cluster*), yaitu sekelompok *speaker* yang diletakkan di atas sumber bunyi asli, setinggi 7 – 13 m, dan agak ke depan sedikit (manusia tidak terlalu peka terhadap pergeseran sumber bunyi secara vertikal, dan lebih peka terhadap pergeseran secara horizontal, kiri-kanan). Kumpulan *speaker* ini dapat disembunyikan di balik tirai dan masing-masing *speaker* diarahkan ke audiensi deretan depan, tengah, maupun belakang. Kelebihan tipe ini, bunyi dari *speaker* sama arahnya dengan posisi sumber bunyi asli (misalnya orang menyanyi atau berpidato), sehingga terasa alami.

- **Tersebar** (*distributed*), yaitu peletakan rangkaian *speaker* di atas audiensi (pendengar). Tipe ini dipergunakan untuk ruangan yang langit-langitnya relatif pendek sehingga tidak memungkinkan memakai tipe terpusat. Tipe ini diutamakan untuk aktivitas yang lebih mementingkan kejelasan bunyi dan tidak terlalu mementingkan arah bunyi, misalnya di ruang kelas dan bandar udara. Termasuk dalam tipe ini adalah *speaker* yang diletakkan di kolom secara merata.
- **Terpadu dengan kursi** (*seat-integrated*), yaitu meletakkan *speaker* secara terpadu di belakang kursi. Tipe ini biasa diterapkan di gereja, ketika bunyi yang pelan tetapi jelas dan merata diperlukan. Biasanya *speaker* diletakkan di belakang sandaran kursi, dan bunyinya akan didengar oleh orang yang duduk di belakang kursi tersebut. Sedang orang di kursi tersebut akan mendengar dari *speaker* di belakang sandaran kursi di depannya.
- **Kombinasi** dari tipe-tipe di atas. Untuk kombinasi tipe terpusat dan tersebar diperlukan alat penunda bunyi (*initial time delay*) agar bunyi dari *speaker* di deretan belakang menunggu datangnya bunyi dari *speaker* terpusat di depan. Jika tidak, maka audiensi yang duduk di deretan kursi belakang akan mendengar bunyi dari *speaker* di deretan belakang terlebih dulu (karena dia lebih dekat) baru kemudian bunyi dari *speaker* di depan. Ini tentu sangat mengganggu dan tidak alami.

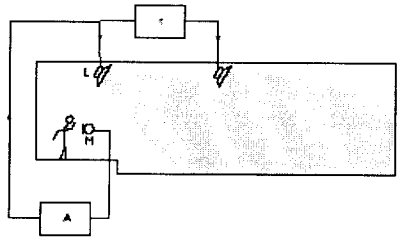


***Gambar 6.7** Sistem terpusat*

Bunyi dari *loudspeaker* tidak boleh tertangkap oleh mike karena akan menyebabkan *feedback* (suara mendenging). Untuk menghindari kerumitan peletakan mike dan *loudspeaker* dapat digunakan *anti feedback*.



***Gambar 6.8** Sistem tersebar*



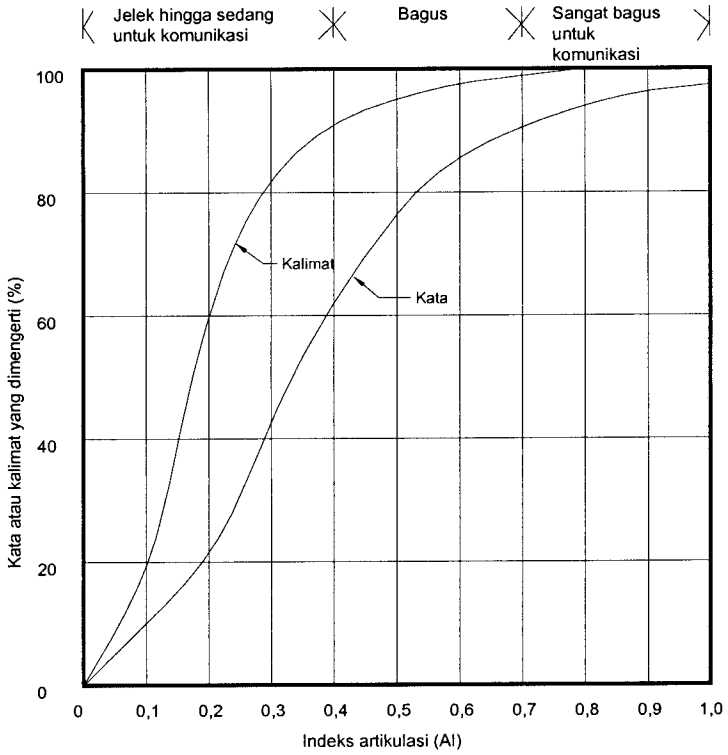
***Gambar 6.9** Sistem tersebar dengan delay, A = amplifier, M =- mike, L = loudspeaker, τ = delay (Kuttruff, 2007)*

Delay diperlukan pada *loudspeaker* belakang agar pendengar di belakang menerima bunyi dari *loudspeaker* depan dan belakang secara bersamaan.

***Tabel 6.1** Perbandingan sistem penempatan loudspeaker*

Sistem	Kerealistisan bunyi	Keterlihatan *loudspeaker*	Penunda sinyal elektronik	Biaya peralatan relatif
Sentral	Sangat baik	Sangat terlihat	Tidak dibutuhkan	Rendah
Tersebar	Jelek	Tidak terlalu terlihat bila ditanam dalam ceruk, tetapi sangat terlihat bila digantung	Kadang-kadang diperlukan	Rendah hingga sedang
Tersebar pada kolom	Sedang	Agak terlihat	Diperlukan	Sedang hingga tinggi
Terpadu dengan kursi	Jelek	Tidak terlalu menonjol	Diperlukan	Tinggi
Kombinasi	Tergantung dari ruangan dan desain sistem			

Indeks artikulasi (*articulation index*) adalah ukuran subjektif untuk menentukan kejelasan percakapan pada suatu ruangan. Indeks artikulasi berentang 0 – 1 dengan 0 berarti sangat buruk (sulit untuk mengerti kata-kata) dan 1 berarti sempurna (sangat jelas). Nilai indeks dibuat dengan menempatkan sekelompok orang di suatu ruangan dan mereka akan menuliskan kalimat, kata dan suku kata yang dibacakan oleh seseorang dari suatu daftar. Kemudian akan dihitung berapa tulisan yang benar sesuai yang diucapkan oleh pembaca tadi. Sebagai contoh, bila dari 100 kata ternyata seorang pendengar benar 90, maka akan dikatakan dia memberikan indeks artikulasi 0,7 pada ruangan tersebut yang dapat dianggap sangat baik (*very good*). Di dalam suatu ruangan, indeks artikulasi ini berbeda-beda, tergantung jarak antara sumber bunyi dan pendengar.

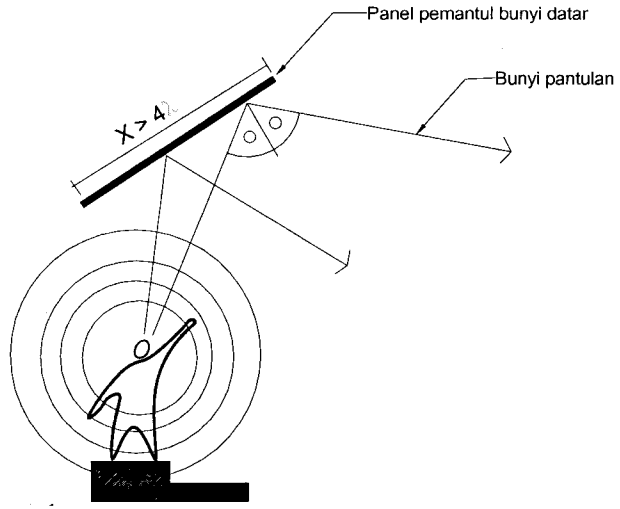


***Gambar 6.10** Indeks artikulasi*

6.2 Ringkasan Pengetahuan Dasar

Sub-bab ini membahas pengetahuan dasar di seputar akustik.

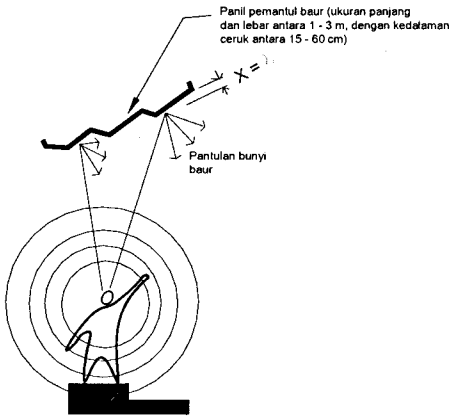
Ukuran dan bentuk permukaan akan memengaruhi bunyi yang mengenainya dalam bentuk **refleksi** (*reflection*, jika panjang atau lebar permukaan lebih besar dari empat kali panjang gelombang bunyi, $x>4\lambda$), **difusi** (*diffusion*, bila kedalaman ceruk sama dengan panjang gelombang bunyi, $x=\lambda$) dan **difraksi** (*diffraction*, bila panjang atau lebar permukaan lebih kecil daripada panjang gelombang bunyi, $x<\lambda$).



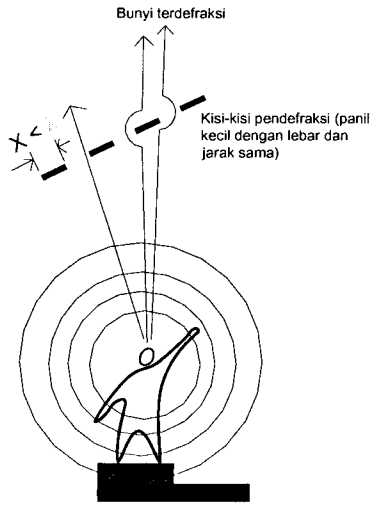
***Gambar 6.11** Refleksi*

Bila gelombang bunyi mengenai bidang yang berukuran 2 – 4 kali lebih besar dari panjang gelombangnya, maka bunyi tersebut akan dipantulkan dengan sudut datang sama dengan sudut pantul. Sebagai contoh, gelombang bunyi 1000 Hz memiliki panjang gelombang (λ) sekitar 0,34m. Dengan demikian permukaan yang memiliki ukuran (panjang atau lebarnya) 4λ = 4(0,34m) = 1,36m akan memantulkan gelombang energi bunyi 1000 Hz (dan yang lebih tinggi, karena semakin tinggi frekuensi bunyi, gelombang semakin pendek) dengan sudut datang sama dengan sudut pantul. Jika kita ingin memantulkan bunyi ke arah tertentu maka kita perlu membuat bidang pemantul dari beragam ukuran agar gelombang bunyi yang dipantulkan bisa lebih lebar rentangannya.

Gelombang bunyi dapat terpantul secara baur (acak) jika mengenai bidang keras berceruk-ceruk (atau berlekuk-lekuk) dengan kedalaman ceruk sama dengan panjang gelombang tersebut. Gelombang bunyi yang datang akan dipantulkan ke banyak arah. Fenomena ini penting bagi ruangan yang digunakan terutama untuk mendengarkan musik karena kita mendengar bunyi dari seluruh arah dengan intensitas relatif sama, seolah-olah ruangan penuh musik, hidup, dan kita tenggelam dalam musik tadi.



***Gambar 6.12** Difusi*

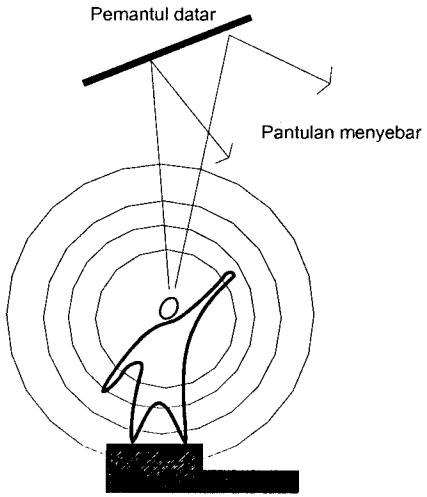


***Gambar 6.13** Difraksi*

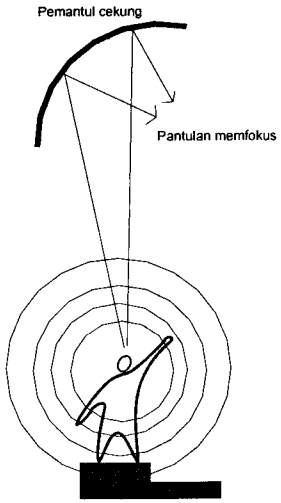
Jika gelombang bunyi mengenai permukaan atau melewati bukaan yang mempunyai ukuran (panjang dan lebar) lebih kecil dari panjang gelombang tadi, dia akan dibelokkan. Kita dapat mendengarkan bunyi sepeda motor yang ada di balik rumah karena gelombang bunyi membelok di sudut rumah tadi.

Bila kita memasang panel-panel di ruangan dengan dimensi sama, maka mungkin akan terjadi perkuatan atau perlemahan frekuensi tertentu saja (dinamakan *diffraction grating effect*). Hal tersebut sangat tidak menguntungkan karena kualitas bunyi (terutama musik) akan jauh berkurang.

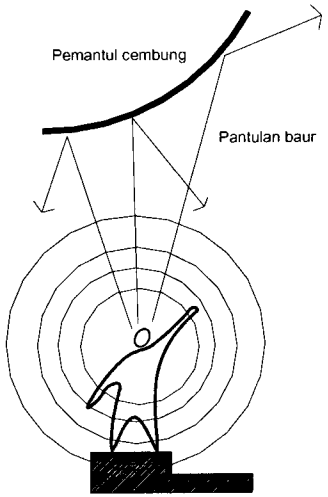
Permukaan pemantul (*reflector*) umumnya mempunyai bentuk cekung (*concave*), datar (*flat*) dan cembung (*convex*). Bentuk cekung (seperti kubah bangunan ibadah, dinding belakang auditorium yang melengkung) dapat memfokuskan pantulan bunyi sehingga menimbulkan titik dengan bunyi lebih keras (*hot spot*) dan gaung (*echo*) di area penonton. Karena bentuk cekung ini tidak mendistribusikan pantulan dengan baik, maka perlu dihindari, terutama pada permukaan yang seharusnya memantulkan (misalnya di belakang panggung). Permukaan datar, bila cukup luas dan diorientasikan dengan baik dapat efektif mendistribusikan bunyi. Permukaan cembung, bila cukup luas, akan sangat efektif mendistribusikan bunyi. Pemantul cembung ini akan mendistribusikan pantulan bunyi secara baur dan dengan rentang frekuensi yang lebih lebar sehingga bagus untuk ruang musik.



***Gambar 6.14** Pemantul datar*



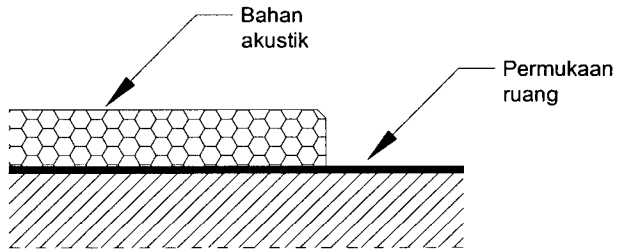
***Gambar 6.15** Pemantul cekung*



***Gambar 6.16** Pemantul cembung*

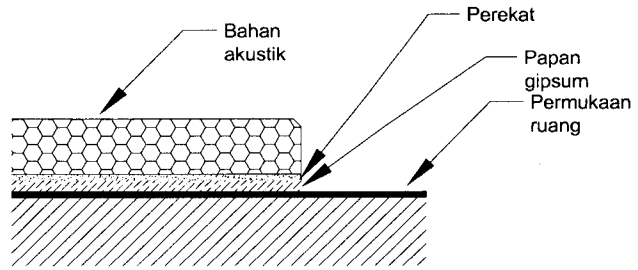
Konstruksi dan bahan permukaan ruangan sangat menentukan perilaku pemantulan bunyi. Bahan akustik yang sama bisa mempunyai koefisien serap bunyi berbeda bila dipasang dengan konstruksi berbeda. Oleh karena itu sangat dianjurkan untuk mengikuti petunjuk pemasangan yang disarankan

oleh pabrik pembuat bahan, yang telah dites di laboratorium. Pada umumnya ada enam cara memasang bahan akustik (tipe A, B, C, D, E, dan F) serta dua cara memasang tirai (tipe G dan H). (Gambar disarikan dari Egan, 1988).



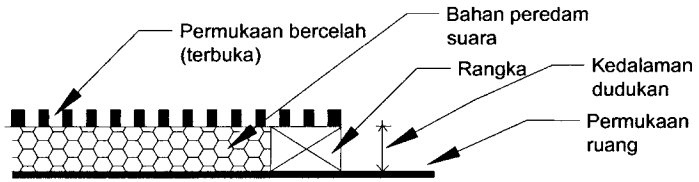
Dudukan tipe A

***Gambar 6.17** Tipe A*



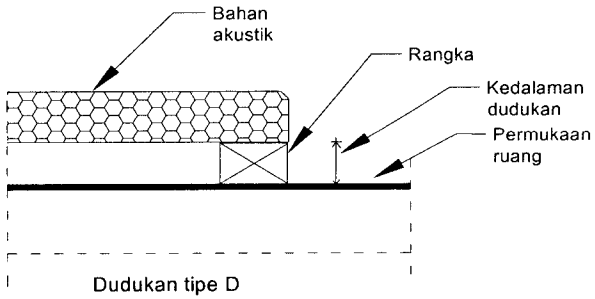
Dudukan tipe B

***Gambar 6.18** Tipe B*

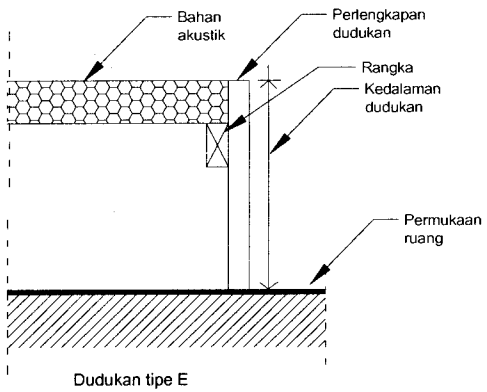


Dudukan tipe C

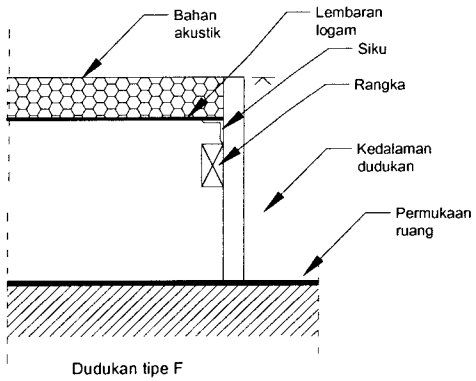
***Gambar 6.19** Tipe C*



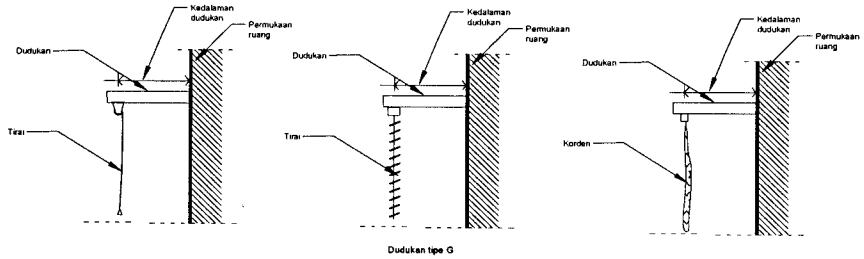
***Gambar 6.20** Tipe D*



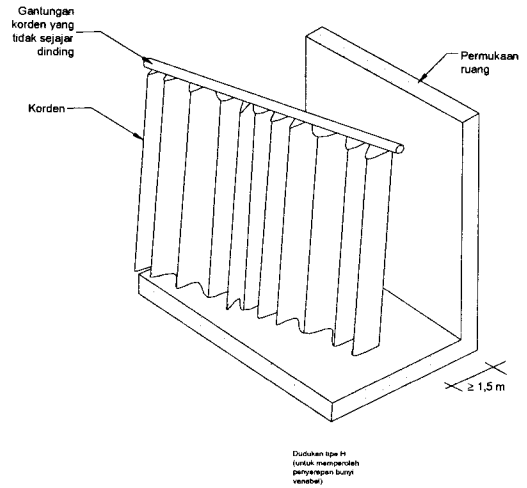
***Gambar 6.21** Tipe E*



***Gambar 6.22** Tipe F*



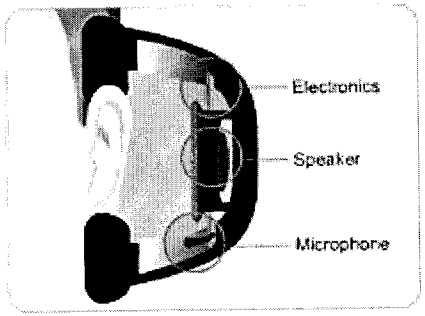
***Gambar 6.23** Tipe G*



***Gambar 6.24** Tipe H*

Hingga saat ini cara yang paling umum meredam kebisingan adalah dengan mencegat atau memutus perambatan bunyi. Sebagai contoh, kita dapat menutup rapat ruangan dengan dinding yang tebal agar bunyi dari luar tidak masuk ke dalam. Namun saat ini ada teknologi baru yang meredam bunyi justru dengan menimbulkan bunyi lain. Secara teoretis, bila gelombang bunyi diintervensi oleh gelombang bunyi lain yang berselisih setengah panjang gelombang, maka puncak gelombang bunyi yang satu akan berhimpit dengan lembah gelombang bunyi yang lain dan resultannya menjadi nol. Bose adalah salah satu perusahan audio yang telah mengembangkan teknologi ini dalam bentuk *headphone*. Anda dapat mendengarkan musik dengan nyaman walau ada di dalam pesawat terbang yang relatif bising,

karena di *headphone* tadi ada *microphone* yang menangkap kebisingan dari luar sepersekian detik sebelum kebisingan tadi sampai ke telinga, mengolahnya, dan mengeluarkan bunyi yang panjang gelombangnya setengah panjang gelombang kebisingan tadi. Akibatnya, bunyi kebisingan tadi dinolkan dan Anda hanya akan mendengar bunyi musik saja.



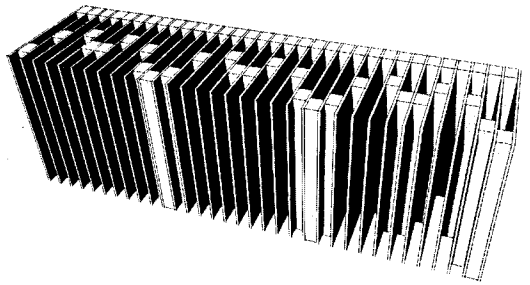
Gambar 6.25 *Headphone peredam suara luar aktif buatan Bose (www.bose.com)*

Agar bunyi terpantul secara baur dapat dibuat *Quadratic Residue Diffuser*. Dinding pantul ini berupa ceruk-ceruk berulang yang mana dalam dan lebar ceruk merupakan perbandingan sisa pembagian kuadrat bilangan cacah oleh bilangan dasar tertentu. Tabel 6.2 berikut menujukkan pemantul baur dengan berbagai bilangan prima. ***Gambar 6.26*** menunjukkan desain *Quadratic Residue Difusser* dengan bilangan prima 11. Dari komposisi berulang 0, 1, 4, 9, 5, 3, 3, 5, 9, 4, 1, 0 oleh bilangan prima 11 (Tabel 6.2) dapat kita buat ceruk-ceruk dengan perbandingan lebar dan dalam seperti komposisi tadi. Jika lebar ceruk 2 cm maka dalam ceruk dapat dibuat 0 cm, 2 cm, 8 cm, 18 cm, 10 cm, 6 cm, 6 cm, 10 cm, 18 cm, 8 cm, 2 cm, 0 cm. Jika ceruk-ceruk dianggap dapat menyebabkan debu, hal itu dapat ditutup dengan kain berpori.

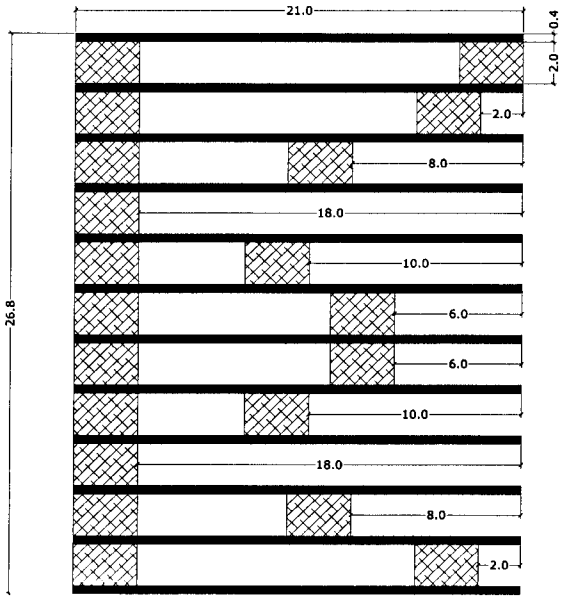
Tabel 6.2 *Perhitungan Quadratic Residue Difusser*

n	n^2	sisa $n^2 : 5$	sisa $n^2 : 7$	sisa $n^2 : 11$
0	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	4	4	4	4
3	9	4	2	9
4	16	1	2	5
5	25	0	4	3
6	36	1	1	3
7	49	4	0	1

n	n^2	sisa $n^2 : 5$	sisa $n^2 : 7$	sisa $n^2 : 11$
8	64	4	1	9
9	81	1	4	4
10	100	0	2	1
11	121	1	2	0
12	144	4	4	1
13	169	4	1	4



Gambar 6.26 *Quadratic Residue Difusser dengan bilangan prima 11 (Satwiko, 2008)*



Gambar 6.27 *Potongan mendatar Quadratic Residue Difusser dengan bilangan prima 11 (Satwiko, 2008)*

6.2.1 Peredaman Bunyi yang Efektif

Ada pendapat agak keliru bahwa ruangan yang berakustik baik selalu memakai bahan peredam bunyi sebanyak-banyaknya. Padahal tidak seperti itu. Pemakaian bahan peredam bunyi tetap harus terkendali. Pada Bab 5 telah disebutkan bahwa ruangan yang menggunakan bahan peredam yang berlebihan justru akan menjadikan ruangan *mati*. Berikut ini ada pesan dari Egan (1988) dalam memakai bahan peredam bunyi:

- Pasanglah bahan-bahan peredam bunyi pada permukaan yang dapat menyebabkan waktu dengung berlebihan, gema menggangu dan *titik api* bunyi. Waktu dengung yang berlebihan akan sangat menggganggu kejelasan percakapan, terutama bagi orang dengan alat bantu pendengaran dan orang tua. Menggandakan luas permukaan peredam akan mengurangi waktu dengung hingga setengahnya.
- Jangan memakai bahan peredam bunyi pada permukaan yang dapat bermanfaat sebagai pemantul seperti pada bidang di atas podium auditorium. Permukaan pemantul bunyi sebaiknya mempunyai koefisien serapan di bawah 0,2 dan dibentuk sedemikian rupa untuk mengarahkan bunyi.
- Jika lantai tidak berkarpet, dinding tidak dilapis korden tebal, dan di ruangan tidak banyak perabot yang meredam bunyi, gunakanlah langit-langit sebagai pengendali kebisingan. Saat ini sudah banyak tersedia bahan peredam bunyi untuk langit-langit yang tahan api, memantulkan cahaya, dan menarik secara arsitektural.
- Tempatkan peredam pada dinding-dinding ruang yang sangat tinggi, kecil, lorong yang panjang dan sempit, yang cenderung menciptakan *flutter echo* (suara gema cepat sekali seperti lecutan).
- Perhatikan baik-baik detail konstruksi pemegang bahan peredam karena sangat berpengaruh terhadap efektivitas peredaman.
- Jangan berlebihan dengan menganggap bahwa bahan peredam bunyi akan banyak mengurangi intensitas bunyi, sebab bahan peredam dipergunakan untuk mengurangi pemantulan. Anda harus menggandakan luas bahan peredam hanya untuk mengurangi intensitas bunyi sebanyak 3dB! Anda membutuhkan penambahan luasan yang banyak sekali jika ingin mengurangi hingga 6dB. Oleh karena itu dalam banyak situasi, pengurangang 3 – 6 dB dianggap sebagai batas praktis pengurangan kebisingan dengan bantuan bahan peredam bunyi!

6.2.2 Penempatan Loudspeaker

Pertimbangan pada tipe terpusat (*central*):

- Tidak boleh ada penghalang antara *speaker* dan audiensi. Seolah-olah pendengar bisa *melihat speaker*. Ingat bahwa frekuensi tinggi sangat fokus (mengarah, *directional*).
- Perbandingan antara jarak dari masing-masing *speaker* nada tinggi ke pendengar terjauh dan terdekat (d2/d1) harus kurang dari 2.
- *Speaker* nada tinggi harus diarahkan langsung ke audiensi sehingga bunyinya tidak dipantulkan oleh permukaan ruangan.
- Lokasi operator harus sedemikian rupa sehingga apa yang dia dengar sama dengan apa yang didengar oleh audiensi.

Pertimbangan pada tipe tersebar (*distributed*):

- Ketinggian langit-langit (H) < 7 m.
- *Loudspeaker* harus disusun sedemikian rupa sehingga setiap pendengar dapat mendengar langsung dari *speaker* terdekat.
- Mungkin diperlukan alat penunda sinyal (*signal delay*) untuk menghindari gema buatan (*artificial echo*) akibat bunyi dari *speaker* terdekat lebih dulu terdengar daripada bunyi dari sumber bunyi asli apabila perbedaan jarak tempuhnya >10m dan tingkat intensitas bunyi sumber bunyi asli 5 – 10 dB lebih besar daripada bunyi dari speaker terdekat tadi.
- Sistem tersebar dengan penunda sinyal harus digunakan di ruangan yang memanjang atau untuk mendukung sistem terpusat terutama di bawah balkon.

6.3 Aspek Perancangan

Pada sub-bab ini akan dibahas berbagai aspek perancangan, antara lain sistem tata suara elektronik yang efektif, pertimbangan akustika dalam memilih rumah, bangunan ibadah, gedung konser, dan ruang mesin dan perlengkapan.

6.3.1 Sistem Tata Suara Elektronik yang Efektif

Sub-bab ini memberikan tip untuk menggunakan *sound system* dengan efektif (diambil dari Egan, 1988):

- Sistem penguat bunyi (*sound-reinforcing system*) yang dirancang dengan baik harus terintegrasi dengan akustik bangunan sehingga akan mendukung transmisi alami bunyi dari sumber ke pendengarnya. Sistem tersebut harus menjaga bunyi di dalam ruang terdistribusi dengan baik dan dengan kekerasan yang cukup. Tidak boleh sama sekali ada anggapan bahwa sistem penguat bunyi dapat menggantikan akustik bangunan yang baik. Dalam banyak kasus, sistem bunyi bahkan dapat membuat akustik bangunan menjadi lebih buruk.
- Bila digunakan oleh pembicara yang berpengalaman, auditorium berkapasitas kurang dari 500 tempat duduk jarang memerlukan sistem penguat bunyi; antara 500 hingga 1000 tempat duduk mungkin mulai memerlukan sistem penguat bunyi; lebih dari 1000 tempat duduk memerlukan sistem penguat bunyi meskipun tidak selalu dipakai. Ruang yang dipergunakan oleh pembicara yang tidak berpengalaman seperti ruang pengadilan dan ruang sidang di perkantoran, tanpa tergantung oleh ukurannya, selalu memerlukan sistem penguat bunyi.
- Pilihan pertama sistem penguat bunyi adalah tipe sentral (*central*), yaitu *loudspeaker* (atau kumpulan *loudspeaker*) yang diletakkan tepat di atas sumber bunyi. Cara ini dianggap paling alami karena bunyi datang dari sumber bunyi.
- Pilihan kedua adalah sistem penguat bunyi tersebar (*distributed*), yaitu penempatan sejumlah besar *loudspeaker* secara tersebar dengan ketinggian rendah. Setiap *loudspeaker* mengeluarkan bunyi yang tidak terlalu kuat untuk melayani area yang tidak terlalu luas di bawahnya. Cara ini dipakai untuk auditorium yang ketinggian langit-langitnya tidak mencukupi untuk memakai sistem sentral, dan bila pendengar tidak dapat melihat langsung ke *loudspeaker* (atau ke kumpulan *loudspeaker*). Sistem tersebar ini terutama dipergunakan bila arah sumber bunyi yang realistis tidak terlalu penting, misalnya hanya untuk menyampaikan pengumuman.

- Letakkanlah mikrofon di luar cakupan bunyi *loudspeaker* untuk menghindari *feedback* (kecuali pembicara dekat dengan mik dan mik tersebut tidak terlalu peka).

6.3.2 Pertimbangan Akustika dalam Memilih Rumah

Jika Anda hendak memilih rumah dan Anda tipe orang yang sangat sensitif terhadap bunyi, cobalah beberapa tip di bawah ini (Sumber `http://bkla.com/acoustical.dos&donts.pdf`):

- Pilihan pertama adalah rumah tinggal yang berdiri sendiri. Pilihan kedua rumah tinggal *townhouse*, dan pilihan terakhir adalah lantai paling atas kondominium.
- Kenali (dan tentunya berusaha hindari) lokasi terdekat dari jalan raya, halte bus (persis di depan rumah?), rel kereta api, bandara, kantor/garasi dinas pemadam kebakaran, stasiun ambulan, diskotek/pub yang mungkin menghasilkan kebisingan hingga larut malam (atau malah hampir pagi!).
- Carilah tahu ke Dinas Tata Kota tentang konsep pengembangan kota dan jaringannya (jangan terlalu percaya pada pengembang!)
- Cobalah berkunjung ke calon rumah Anda beberapa kali pada saat yang berbeda. Sunyi di satu saat belum tentu begitu di saat lain. Pesawat terbang dapat tinggal landas dan mendarat dari arah yang berbeda, tergantung arah angin.
- Rasakanlah kondisi akustik di luar dan di dalam rumah.
- Berjalanlah berkeliling rumah dan catatlah keadaan lahan yang bersebelahan. Jika lahan masih kosong, tanyakan kepada perencana lingkungan/kota akan difungsikan sebagai apa. Jika ada pepohonan rimbun yang menutupi pandangan, periksalah ada apa di baliknya. Bila rumah Anda akan ditinggali beberapa keluarga, keadaan lingkungan yang amat sunyi justru akan menyebabkan gangguan privasi akustik karena setiap pembicaraan akan terdengar jelas.
- Ajaklah orang lain, mintalah berjalan di lantai atas, mengguyur toilet, dll. Rasakanlah apakah bunyi-bunyi tersebut masih dapat diterima.

- Catatlah letak elevator (jika di bangunan berlantai banyak), letak transformer utama, serta tempat pembuangan sampah. Dengarkanlah bunyinya dari dalam rumah.
- Tanyakan pada kontraktor apakah pipa pembuangan dari besi digunakan.
- Mintalah gambar kerja bangunan dari arsitek. Anda mungkin akan memerlukannya jika ingin mengadakan perbaikan.
- Yakinkanlah bahwa denah ruang di atas dan di bawah rumah Anda (bila menjadi bagian bangunan berlantai banyak) sama. Itu berarti di atas dan di bawah dapur Anda ada dapur tetangga. Di atas dan di bawah toilet Anda ada toilet tetangga. Jadi jangan sampai di atas kamar tidur ada toilet tetangga.
- Mintalah konfirmasi tertulis posisi penghuni terhadap penutup lantai. Jangan sampai tetangga Anda di atas mengubah karpet ke marmer.
- Mintalah konfirmasi tertulis posisi penghuni terhadap piano dan organ.
- Jika sudah ada tetangga, bicaralah dengan mereka apakah ada masalah kebisingan, apakah mereka dapat saling mendengar dengan tetangga lain, dsb.
- Mintalah kopi catatan dewan penghuni tentang adanya komplain beberapa tahun belakangan, adakah keluhan yang berhubungan dengan kebisingan dan bagaimana masalah tersebut diselesaikan.
- Mintalah jaminan tertulis dari wakil penjual atau pengembang mengenai klaim untuk permasalahan kebisingan.
- Untuk kondominium (rumah susun), carilah unit yang paling sedikit mempunyai dinding yang beradu dengan tetangga (misalnya di sudut). Di perumahan, carilah yang di ujung.
- Jangan membeli rumah di dekat elevator, lubang pembuangan sampah, ruang olahraga atau ruang pesta.
- Jangan membeli pemandangan yang tak terlihat!
- Jangan hanya mengunjungi rumah pada hari Minggu!

- Jangan mau kamar tidur Anda bersebelahan dengan dapur dan di atas Anda ada kamar mandi!
- Jangan berharap bahwa Anda tidak akan mendengar sama sekali tetangga Anda.
- Jangan menawar tanpa mempertimbangkan hal-hal di atas!

6.3.3 Bangunan Ibadah

Bangunan ibadah, seperti gereja, mempunyai akustik yang unik. Di gereja, misalnya, ada aktivitas khotbah dan menyanyi, baik yang dilakukan oleh jema'at ataupun paduan suara. Berbeda dengan di auditorium sekuler, di gereja suara pemimpin ibadah perlu diberi sentuhan akustik agar lebih berwibawa dan menarik. Suara pendeta tidak hanya perlu jelas tetapi juga harus mantap berwibawa. Jika sedang membaca kitab suci, misalnya, atau berdo'a, tinggi rendah dan penekanan suara sangat penting. Demikian pula suara paduan suara harus dapat memenuhi seluruh ruangan gereja, dan terkendali (keras-lembutnya) dengan baik.

Ada satu rumus yang disebut *sweetspot* (dari Joseph De Buglio) yang dapat dipergunakan sebagai pedoman peletakan *speaker* di gereja. Rumus ini belum dikaji secara ilmiah, namun secara empiris banyak dipercaya cocok untuk gereja (`http://www.jdbsound.com/art/art532.html`). Inti dari *sweetspot* adalah peletakan *speaker* tipe terpusat (*cluster*) pada jarak (L-W)/2 + W dihitung dari dinding belakang ruang gereja (L adalah panjang ruangan, W adalah lebar ruangan). Secara sederhana kumpulan *speaker* akan berada di posisi antara 1/3 dan 1/4 panjang ruangan dihitung dari depan (mimbar) dan tepat di tengah antara dinding kiri dan kanan.

Beberapa pedoman untuk desain akustik gereja (disarikan dari Egan, 1988):

- Untuk musik, gereja berdenah sempit dengan volume ruang besar akan sangat bagus. Denah melebar dengan jema'at mengelilingi mimbar kurang baik karena kurangnya bunyi lateral yang dibutuhkan agar musik terasa mengisi penuh gereja. Sebagai pedoman volume ruangan, jika gereja lebih banyak digunakan untuk musik maka volume ruang per orang antara 6 – 12m^3. Jika khotbah lebih penting dan mendominasi acara, maka volume ruang per orang sebaiknya antara 5 – 8 m^3. Hindari ceruk yang terlalu dalam karena jema'at yang duduk di situ tidak akan mendengar bunyi gema yang bagus.

- Mimbar harus diangkat dan berada dekat dengan dinding. Jika langit-langit terlalu tinggi, buatlah kanopi mimbar yang diarahkan ke jema'at untuk memperoleh suara langsung yang lebih baik dan menghindari pantulan yang terlalu lama.
- Hindarilah bentuk-bentuk kubah atau cekungan yang akan menciptakan *titik api* bunyi.
- Atur kursi sedemikian rupa sehingga seluruh jema'at dapat melihat mimbar dan jarak jema'at ke mimbar sekecil-kecilnya agar ucapan dari mimbar terdengar lebih baik.
- Permukaan dinding dan langit-langit sebaiknya dari bahan pemantul bunyi, dengan bentuk cembung atau berceruk-ceruk untuk menciptakan dengung, difusi dan pantulan lateral bunyi yang diperlukan (agar jema'at di kelilingi oleh bunyi!). Hindarilah bahan yang terlalu banyak meredam frekuensi rendah.
- Sisi bawah balkon perlu diberi peredam untuk menghindari echo atau permukaannya dibentuk berlekuk-lekuk.
- Tempatkan organ dan paduan suara berdekatan (< 13m) agar diperoleh keseimbangan antara bunyi organ dan suara paduan suara. Kelilingi keduanya dengan bahan pemantul bunyi (tetapi bukan ceruk yang terlalu dalam) untuk mengarahkan bunyi ke jema'at. Langit-langit di atas paduan suara jangan terlalu tinggi (< 7m). Hindarilah penggunaan karpet pada area paduan suara karena permukaan daerah ini harus dapat memantulkan bunyi.
- Untuk mendukung kegiatan meditasi, kebisingan harus ditekan serendah-rendahnya. Tingkat kebisingan ruang yang disebabkan oleh peralatan mekanik (seperti lubang AC) harus memenuhi NC-25 (*Noise Criterion 25 dB*). Maksudnya, bunyi latar belakang yang ada di ruang tersebut jangan lebih dari 25dB.
- Untuk meningkatkan kejelasan ucapan pemimpin ibadah di ruangan yang berdengung, pakailah *speaker* sistem terpusat yang terarah ke area jema'at. Atau dapat juga dengan sistem tersebar dengan penunda sinyal.

Tip dari ahli akustik gereja bernama Joseph de Buglio;

(http://www.jdbsound.com/work/art512.html)

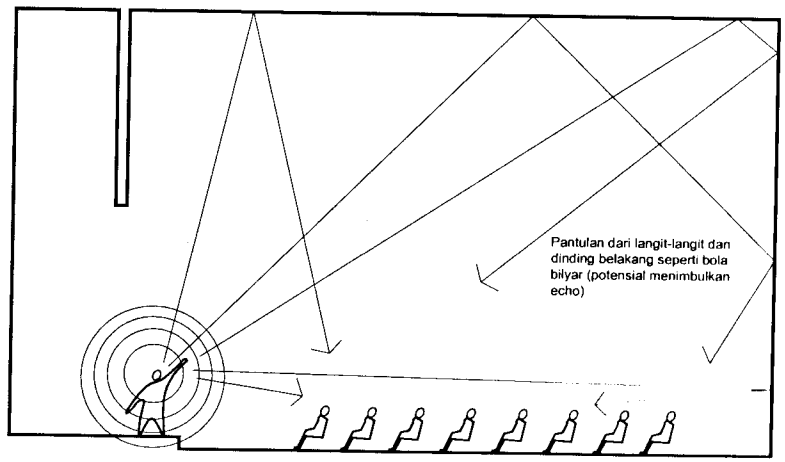
- Jangan merancang gereja dengan bentuk denah bujur sangkar, oval, lingkaran atau segi delapan.
- Jangan merancang gereja dengan dinding sejajar tanpa lapisan pembaur (*diffuse*).
- Jangan membuat ketinggian langit-langit di atas jema'at lebih rendah daripada mimbar. Bayangkanlah sebuah terompet atau gelombang bunyi yang melebar.
- Jangan membuat langit-langit lebih rendah dari 8m.
- Jangan mengukur waktu dengung hanya berdasarkan RT_{60} 1000 Hz; setidaknya harus antara 200 – 5000 Hz.
- Jangan membuat dinding belakang gereja yang besar dan datar karena akan menimbulkan gema yang akan merusak suara khotbah dan musik (sulit bagi pemusik untuk mengatur tempo karena kisruh).
- Jangan memakai *air handling unit* (AHU) dengan tingkat kebisingan lebih dari 25dB atau NC 30. Setiap kebisingan lebih dari 40dB (berapa pun frekuensinya) akan mengganggu kegiatan di gereja.
- Jangan memakai AC dengan kapasitas penyejukan lebih kecil dari 1 ton per $47m^2$.
- Jangan memakai pencahayaan kurang dari 700 lux di area jema'at dan 1500 lux di mimbar (untuk Indonesia 350 lux dan 750 lux sudah cukup - Satwiko).
- Jangan menerima ruang gereja dengan angka kejelasan ucapan 90% dengan *sound system* atau 92% tanpa *sound system* pada 4 deret kursi pertama.
- Jangan membuat denah berbentuk kipas lebih besar dari 160^o.
- Jangan pisahkan organ dan piano lebih dari 7m.
- Jangan meletakkan pipa organ atau speaker organ di atas paduan suara.

- Jangan letakkan piano di ceruk atau di dekat dinding dan lantai berkarpet.
- Jangan membuat balkon dengan langit-langit setinggi 3m sebelum 8 deret kursi pertama.
- Jangan menggantung partisi di atas depan altar kecuali memang akan membuat bentuk teater.
- Jangan menempatkan speaker di partisi tersebut.
- Jangan mengecat papan akustik.
- Jangan memasang kabel-kabel dan amplifier dekat dengan *relay* untuk menghindari imbar bunyi klik.
- Jangan membuat gang dari bahan keras.
- Jangan hanya bergantung pada hasil simulasi komputer, tetapi cek hasil di lapangan atau kalibrasikan antara hasil simulasi dengan keadaan nyata.
- Jangan meletakkan meja *mixer* operator di luar ruang ibadah.
- Jangan meletakkan *mixer* di dalam ruang yang menempel pada ruang ibadah.
- Jangan meletakkan meja *mixer* menghadap dinding.
- Jangan meletakkan *mixer* di balkon.
- Letakkan *mixer* di lantai utama, di tepi tidak masalah bila ruang *diffuse.*
- Jangan memakai lebih dari satu panel listrik untuk *sound system.*
- Jangan meletakkan mesin AC di atas ruang ibadah.
- Jangan meletakkan mesin AC menempel langsung pada ruang ibadah untuk menghindari perambatan bunyi melalui struktur.
- Jangan meletakkan mesin AC di dalam ruang ibadah.
- Jangan memasang *air return* dengan panjang *ducting* kurang dari 7m dari mesin AC.
- Jangan meletakkan *air return* di dekat operator *sound system.*
- *Air return* harus dua kali lebih luas daripada *air supply.*

6.3.4 Gedung Konser

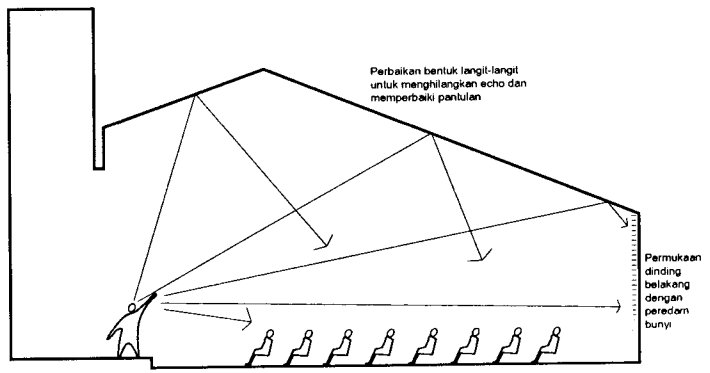
Gedung konser (*concert hall*) termasuk bangunan yang memiliki akustik kritis. Arsitek perlu didampingi ahli akustik untuk memperoleh desain yang sempurna. Berikut ini adalah pedoman sederhana bagi arsitek, yang dapat dipergunakan dalam tahap awal desain (disarikan dari Egan, 1988):

- Waktu dengung (T_R) pada frekuensi tengah (rata-rata untuk 500 dan 1000Hz) di saat ruangan penuh antara 1,6 dan 2,4 detik untuk opera, simfoni, organ dan paduan suara. Ingat bahwa bunyi musik di ruangan yang memiliki waktu dengung tepat akan sangat hidup, memenuhi ruangan dan memadu dengan baik. Namun jika waktu dengung berlebihan maka akan menyebabkan bunyi musik campur aduk, kisruh, tidak dapat dibeda-bedakan.
- Untuk pertunjukan musik, rasio bass (*bass ratio*) harus lebih besar dari 1,2. Rasio bass adalah perbandingan antara waktu dengung frekuensi rendah (rata-rata untuk 125 dan 250Hz) dan frekuensi tengah (rata-rata untuk 500 dan 1000Hz). Rasio bass yang tinggi akan memberikan kesan *kehangatan*. Hindarilah pemakaian panel-panel tipis (misalnya papan kayu <3/4") yang akan meredam bunyi frekuensi rendah!



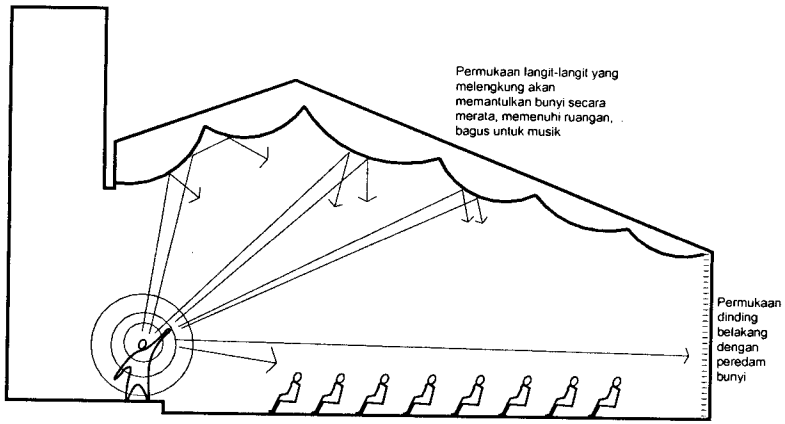
Gambar 6.28 *Pantulan bunyi pada langit-langit datar yang cenderung menimbulkan gema*

- Keintiman (*intimacy*) dapat diperoleh dengan mengusahakan celah tunda waktu awal (*initial-time-delay gap*, ITDG) kurang dari 20 ms (*milisecond*, mili-detik, seperseribu detik) untuk bunyi pantulan. (*Initial time delay gap* adalah waktu selang antara kedatangan bunyi langsung dan bunyi pantulan pertama yang harus kurang dari 30 ms, yaitu setara dengan perbedaan jarak tempuh 34 ft atau 10,36 m). Ruangan musik berbentuk empat persegi panjang sebaiknya mempunyai perbandingan panjang dan lebar (L/W) kurang dari 2. Secara empiris terbukti bahwa gedung konser yang baik di Eropa mempunyai perbandingan tinggi dan lebar (H/W) lebih besar 0,7!
- Kekerasan (*loudness*) ditentukan oleh volume ruangan, peredaman bunyi dan bentuk sisi depan ruangan. Untuk ruangan berbentuk empat persegi panjang dengan panggung di depan, volume ruang per orang adalah $8m^3$. Untuk panggung di tengah, volume ruang per orang adalah $13m^3$.
- Kepadatan tempat duduk $0,6 - 0,8\ m^2$.
- Permukaan dinding samping, langit-langit, dinding balkon, dan dinding panggung harus dapat memantulkan bunyi secara baur (*difuse*). Hindarilah permukaan-permukaan yang rata.
- Permukaan pemantul bunyi di dekat panggung harus dapat memantulkan bunyi kembali ke panggung sehingga pemain dapat merasakan respons ruangan yang memadai.



Gambar 6.29 *Langit-langit yang dimanfaatkan untuk memantulkan bunyi lebih terarah ke audiensi dan mengurangi gema*

- Hindarilah permukaan-permukaan yang menyebabkan gema (*echo*), lecutan (*flutter*, bunyi seperti lecutan akibat pantulan yang cepat), rayapan (*creep*, bunyi yang merambat di permukaan kubah).
- Tingkat kebisingan latar belakang (*background noise level*) harus mendekati ambang pendengaran, yaitu NC-15. Jadi boleh dikatakan di dalam gedung konser yang baik, suasana akan sangat senyap sehingga pemusik memiliki banyak kebebasan untuk bermain dengan pelan dan keras bunyi!



Gambar 6.30 *Langit-langit yang dimanfaatkan untuk memantulkan bunyi secara baur agar bunyi memenuhi ruangan, bagus untuk ruang musik*

6.3.5 Ruang Mesin dan Perlengkapan

Ruang mesin merupakan sumber kebisingan. Beberapa cara untuk menanganinya adalah sebagai berikut (disarikan dari Egan, 1988):

- Letakkan ruang mesin jauh dari ruangan yang sensitif terhadap bunyi.
- Pakailah mesin atau peralatan yang mengeluarkan kebisingan rendah.
- Gunakan konstruksi dinding, lantai dan langit-langit yang mempunyai nilai kehilangan transmisi (*transmission loss*, isolasi bunyi) besar. Ingat bahwa mesin dapat menimbulkan bunyi hingga 100 dBA sehingga mungkin diperlukan lantai apung, dinding berat dan langit langit gantung untuk meredam penjalaran bunyi tersebut.

- Isilah dinding dan langit-langit dengan bahan peredam bunyi yang banyak untuk mencegah timbulnya kebisingan melalui udara.
- Gunakan bahan-bahan yang lembek (seperti pegas) di bawah lantai untuk mengisolasi rambatan bunyi (mencegah) ke struktur bangunan.

6.4 Aspek Matematis

6.4.1 Jarak *Loudspeaker* ke Pendengar (untuk T < 2dtk)

$$\mathbf{d = 0{,}18.(QV/T_R)^{0{,}5}\ m}$$

dengan
- d = jarak maksimum *loudspeaker* – pendengar, m
- Q = direktivitas *loudspeaker* (antara 2 – 15, semakin besar nilainya berarti semakin terarah atau fokus, untuk suara orang direktivitasnya adalah 2 pada 500Hz), tanpa unit
- V = volume ruang, m^3
- T_R = waktu dengung, dtk

6.4.2 Jarak (distribusi) Antar *Loudspeaker*

$$\mathbf{s = 1{,}4.(h - 1{,}2)\ m}$$

dengan
- s = jarak antar-*loudspeaker*, m
- h = ketinggian langit-langit dari lantai, m
- 1,2 = rata-rata ketinggian telinga manusia duduk, m (gantilah dengan angka 1,7 bila ruangan tersebut untuk pendengar berdiri!)

6.4.3 *Loudspeaker* Bunyi Latar (*Background Masking*)

$$\mathbf{s = 1{,}4\ (2d + h - 1{,}2)\ m}$$

dengan
- s = jarak antar-*loudspeaker*, m
- d = ketinggian rongga langit-langit, m
- h = ketinggian langit-langit dari lantai, m
- 1,2 = rata-rata ketinggian telinga manusia duduk, m (gantilah dengan angka 1,7 bila ruangan tersebut untuk pendengar berdiri!)

6.4.4 Ketinggian Langit-langit Auditorium

$$\mathbf{h = 6{,}1\ T_R\ m}$$

dengan
- h = rata-rata ketinggian langit-langit dari lantai, dengan kursi terbungkus dan dinding belakang meredam bunyi, m
- T = waktu dengung untuk frekuensi tengah, dtk.

6.4.5 Frekuensi Resonansi Panel Getar (*Vibrating Panel*)

Panel resonan (*resonant panels*) adalah panel peredam bunyi frekuensi rendah ≤ 250Hz.

$$\mathbf{F_r = 207{,}4/(w.d)^{0{,}5}\ Hz}$$

dengan
- F_r = frekuensi resonansi panel, Hz
- w = berat panel, kg/m^2
- d = kedalaman udara di belakang panel, m

6.5 Contoh Perhitungan

6.5.1 Menghitung Jarak Maksimum Loudspeaker ke Pendengar

Soal:

Hitunglah jarak maksimum *loudspeaker* ke pendengar bila diketahui ukuran ruangan panjang 20m, lebar 10m dan tinggi 4m. *Loudspeaker* yang digunakan jenis biasa dengan direktivitas 6. Waktu dengung ruang, T_R , 1,2 dtk.

Jawab:

Akan digunakan rumus $\mathbf{d = 0{,}18.(QV/T)^{0{,}5}}$

Direktivitas *speaker* = 6

Volume ruang (V) = $(20)(10)(4)m^3 = 800m^3$

Waktu dengung (T_R) = 1,2 dtk

Jadi jarak maksimum *speaker* ke pendengar:

$$\mathbf{d = 0{,}18.(QV/T_R)^{0{,}5}}$$
$$= 0{,}18\ \{(6)(800)/1{,}2\}^{0{,}5}$$
$$\mathbf{11{,}38m}$$

6.5.2 Menghitung Jarak Antar Loudspeaker

Soal:

Hitunglah jarak antar-speaker (sistem terdistribusi di langit-langit) pada ruang kuliah bila ketinggian langit-langit 3,6m.

Jawab:

Kita akan menggunakan rumus **s = 1,4.(h –1,2).**

Ketinggian langit-langit (h) = 3,6m. (Ingat angka 1,2 kita biarkan tetap karena ruang kuliah tersebut diasumsikan dipergunakan dalam keadaan duduk. Angka 1,2 adalah ketinggian rata-rata telinga manusia dalam keadaan duduk. Jika ruang tersebut dipergunakan dalam keadaan berdiri maka angka 1,2 kita ganti 1,7 yaitu rata-rata ketinggian telinga manusia dalam keadaan berdiri!)

Jadi jarak antarspeaker adalah:

s = 1,4.(h –1,2)
= 1,4.(3,6-1,2)
= 3,36 m

6.5.3 Menghitung Jarak antar *Loudspeaker* untuk Bunyi Latar

Soal:

Hitunglah jarak antarspeaker (sistem terdistribusi pada langit-langit) untuk bunyi latar pada ruang kantor bila tinggi langit-langit 3,6m dan rongga (jarak antara *speaker* dan permukaan di atasnya) 0,8m.

Jawab:

Akan digunakan rumus s = 1,4 (2d + h – 1,2) m.

Ketinggian langit-langit (h) = 3,64 dan jarak antara susunan speaker dan permukaan di atasnya (d) = 0,8m.

Maka jarak antarspeaker:

s = 1,4 (2d + h – 1,2) m
= 1,4 {2(0,8) + 3,6 – 1,2 }
= 5,6 m

Jadi jarak antarspeaker 5,6m!

6.5.4 Menghitung Ketinggian Langit-langit Auditorium

Soal:

Hitunglah rata-rata ketinggian langit-langit sebuah auditorium bila waktu dengung nada tengah 2,2 dtk.

Jawab:

Akan dipakai rumus **$h = 6,1\ T_R$.**

Jika waktu dengung (T_R) = 2,2 maka rata-rata ketinggian langit-langit yang disarankan:

$h = 6,1\ T_R$
$= 6,1.(2,2)$
= 13,42 m

6.5.5 Menghitung Resonansi Panel Getar

Soal:

a. Hitunglah frekuensi resonansi sebuah panel seberat 50kg/m^2 yang diletakkan sejauh 0,4m dari dinding.
b. Hitunglah frekuensi resonansi bila panel diganti dengan material seberat 10kg/m^2.

Jawab:

Akan kita gunakan rumus **$F_r = 207,4/(w.d)^{0,5}$ Hz.**

a. Berat panel (w) = 50kg/m^2; kedalaman rongga udara di belakang panel (d) = 0,4m.

   Maka resonansi panel:

   $F_r = 207,4/(w.d)^{0,5}$ Hz
   $= 207,4/\{(50)(0,4)\}^{0,5}$
   = 46,38 Hz

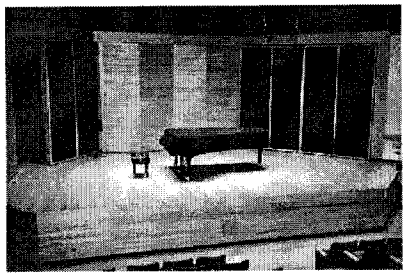
   Jadi panel tadi akan meredam nada yang cukup rendah, yaitu 46,38Hz!

b. Untuk berat panel (w) = 10 kg/m^2 maka resonansi:

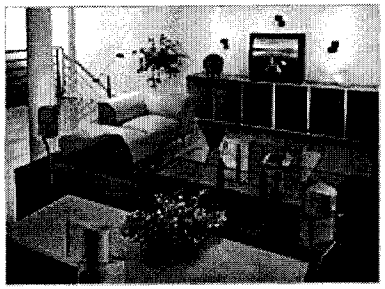
   $F_r = 207,4/(w.d)^{0,5}$ Hz
   $207,4/\{(10)(0,4)\}^{0,5}$
   103,7 Hz

Ternyata bila memakai panel lebih ringan, dengan rongga sama, frekuensi yang diredam lebih tinggi, yaitu 103,7 Hz.

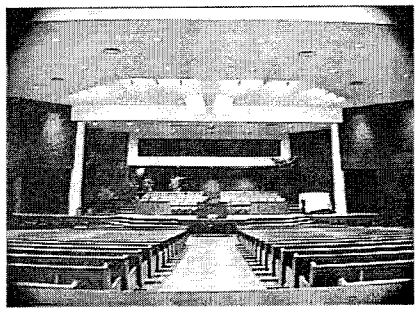
6.6 Galeri



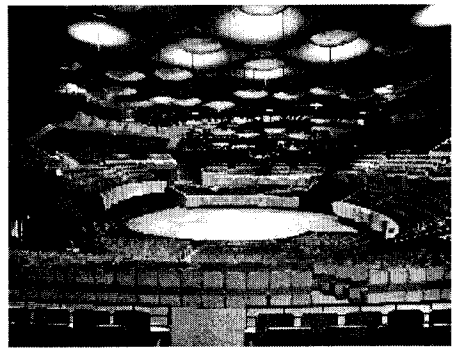
Gambar 6.31 *Pengaturan material dinding untuk memperoleh bunyi piano yang alami (http://www.bkla.com/laterals.htm)*



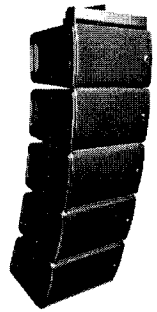
Gambar 6.32 *Teater rumah (http://www.bose.com)*



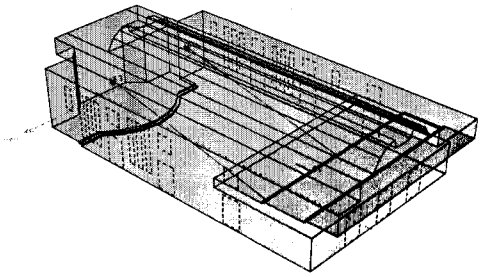
Gambar 6.33 *Contoh peletakan speaker terpusat pada Forward Baptist Church (kapasitas 800 tempat duduk), Cambridge, Ontario, Canada yang dikerjakan oleh David Yake Enterprises. Speaker digantung di atas depan. (http://www.jdbsound.com/art/sample2.htm)*



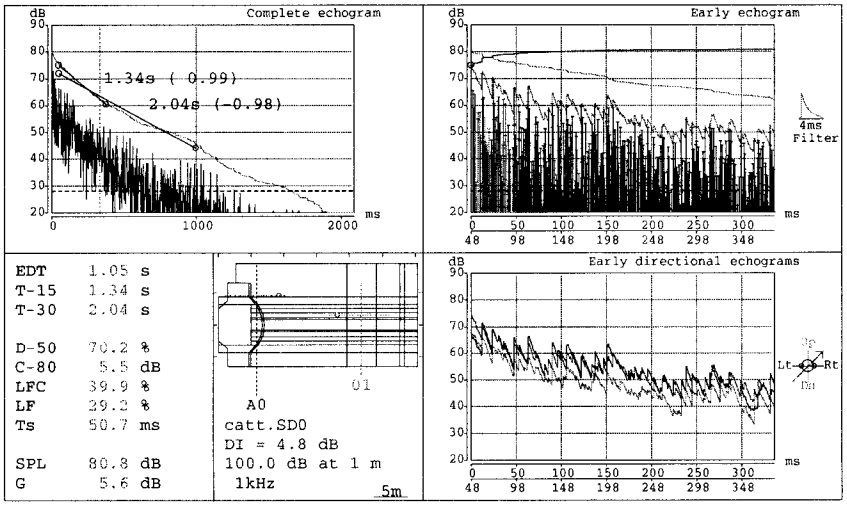
Gambar 6.34 *Boettcher Concert Hall, Denver, berkapasitas 2634 tempat duduk yang disusun mengelilingi panggung, sehingga 80% dari audiensi berada kurang dari 22m dari panggung. Langit-langit digantungi 108 cakram untuk memantulkan bunyi secara baur merata ke seluruh ruang. (http://www.denvergov.org/Boettcher_Concert_Hall/template2755.asp)*



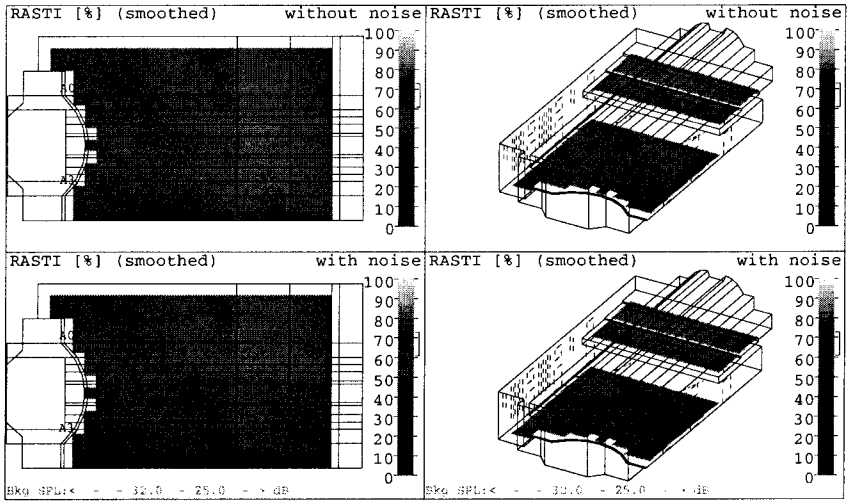
Gambar 6.35 *Line array speaker untuk mengarahkan bunyi pada area-area berbeda (www.pro-music-news.com).*



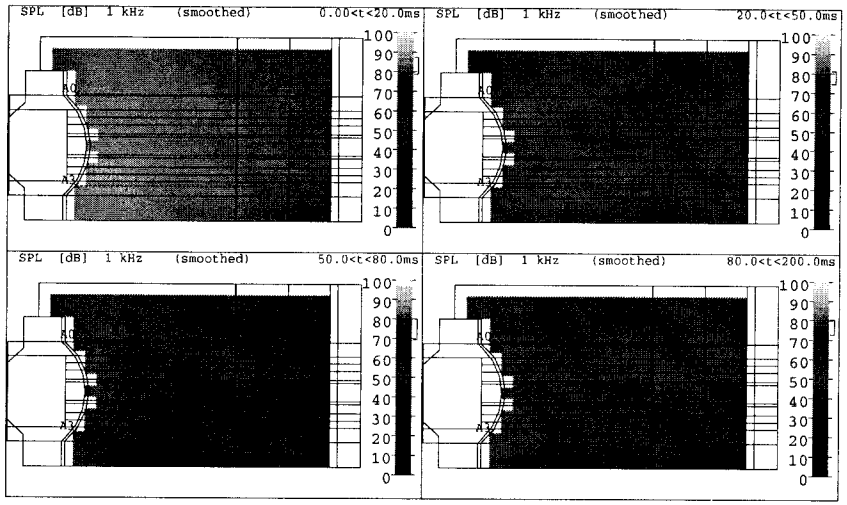
Gambar 6.36 *Model interior ruang gereja untuk dianalisis dengan CATT 8.0 (Satwiko, 2008)*



Gambar 6.37 *Hasil simulasi akustik ruang gereja di atas dengan CATT 8.0 (Satwiko, 2008)*



Gambar 6.38 *Map RASTI (RApid Speech Transition Index) ada ruang jema'at yang menunjukkan distribusi kualitas kejelasan suara (Satwiko, 2008)*

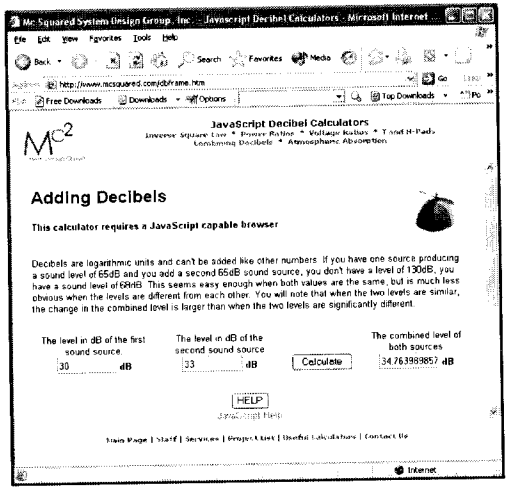


Gambar 6.39 *Map SPL pada ruang jema'at yang menunjukkan distribusi tingkat intensitas bunyi (Satwiko, 2008)*

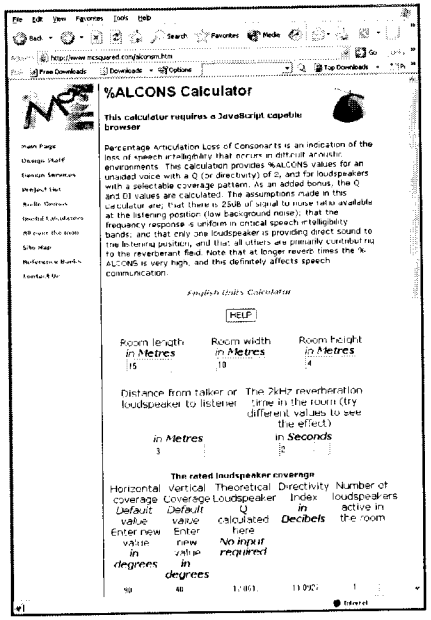
6.7 Alamat Internet

http://www.bkl.ca/; contoh salah satu konsultan akustik yang sangat berdedikasi, tidak saja untuk melayani proyek namun juga memberikan pendidikan akustika bagi masyarakat.
http://www.jblpro.com/pages/software_downloads.htm; website JBL yang menyediakan banyak sekali *software* untuk di-*download*!
http://www.jdbsound.com/index.html; CSN (The Church Sound Network), jaringan akustik gereja.
http://www.mcsquared.com/reverb.htm; memberikan contoh nyata bunyi pada ruang dengan waktu dengung berbeda-beda.
http://www.stirlingaudioservices.com/gloss.htm; contoh situs yang memberikan penjelasan atas istilah-istilah yang berhubungan dengan sistem bunyi.
http://www.usspeaker.com/homepage.htm; informasi tentang macam-macam *speaker*.

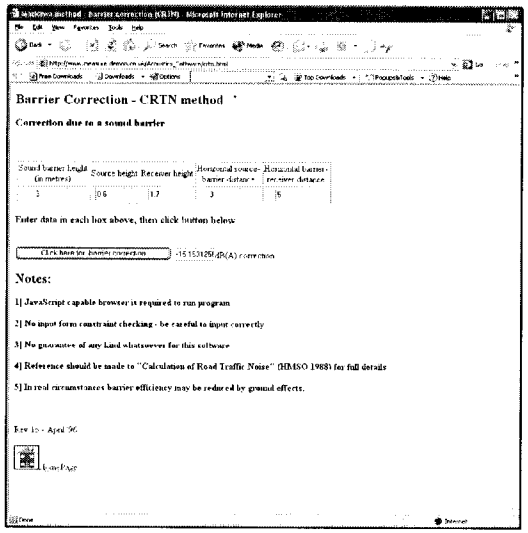
6.8 Software



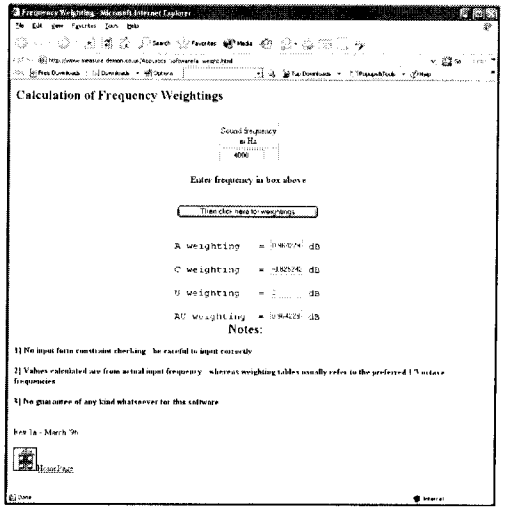
Gambar 6.40 *Adding Decibels*
(http://www.mcsquared.com/dbframe.htm)



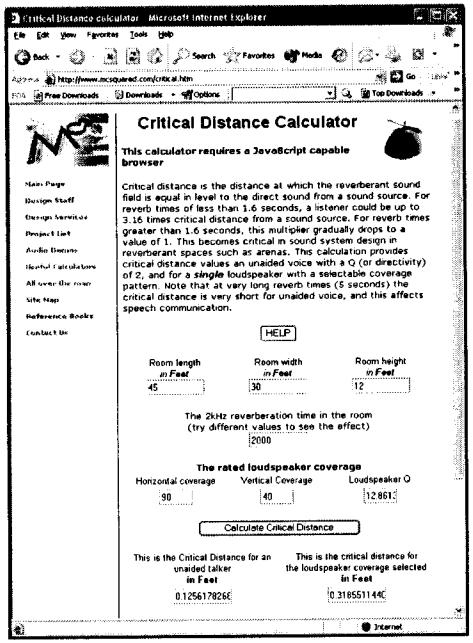
Gambar 6.41 *%Alcons*
(http://www.mcsquared.com/alconsm.htm)



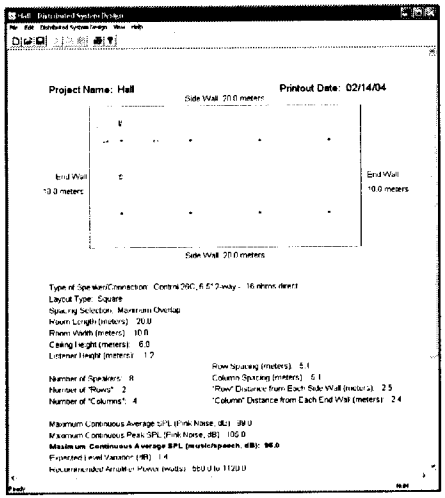
Gambar 6.42 *Barrier Correction*
(http://www.measure.demon.co.uk/Acoustics_Software/crtn.html)



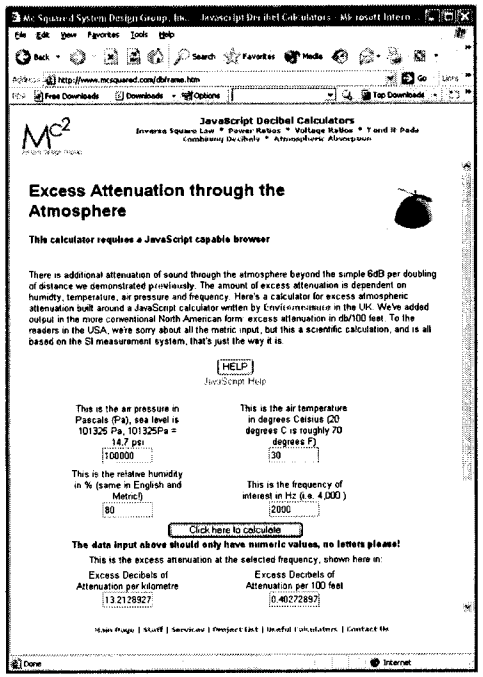
Gambar 6.43 *Calculation of Frequency Weighting*
(http://www.measure.demon.co.uk/Acoustics_Software/a_weight.html)



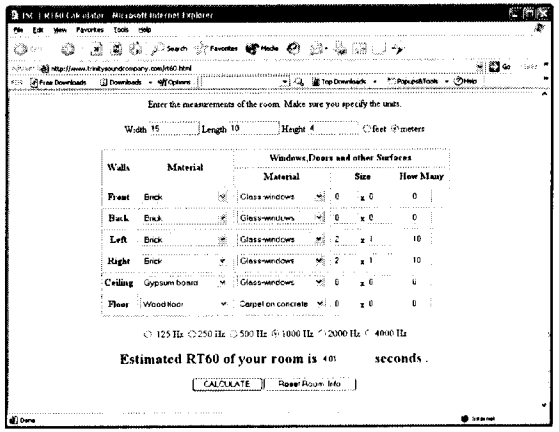
Gambar 6.44 *Critical Distance*
(http://www.mcsquared.com/critical.htm)



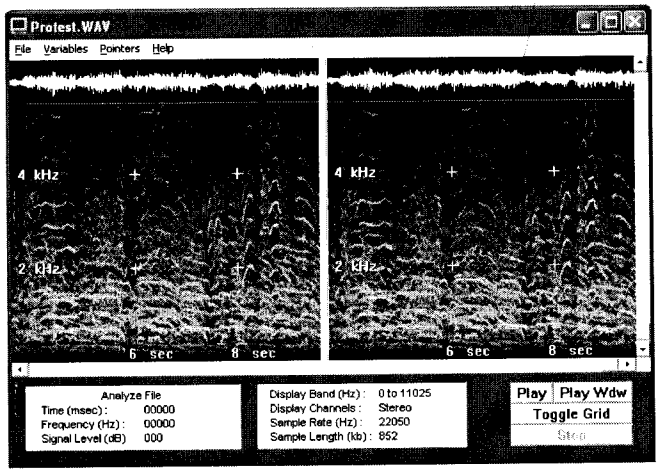
Gambar 6.45 *DSDv1 3 4.*
(www.jblpro.com/pub/software)



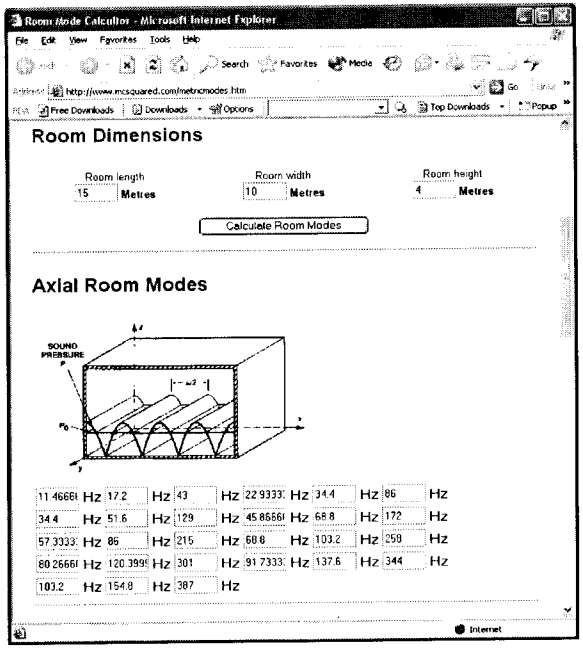
Gambar 6.46 *Excess Attenuation*
(http://www.mcsquared.com/dbframe.htm)



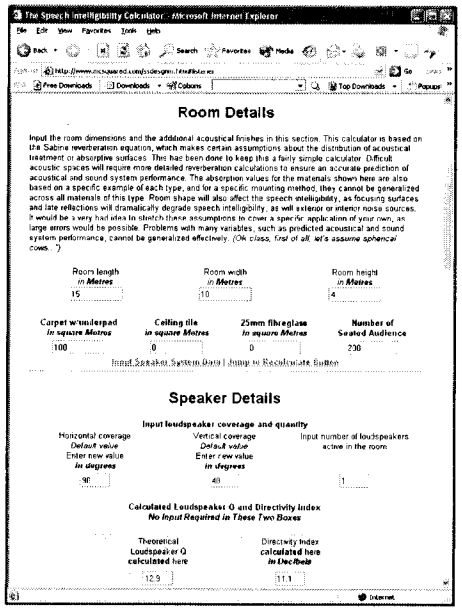
Gambar 6.47 *Estimated RT60*
(http://www.trinitysoundcompany.com/rt60.html)



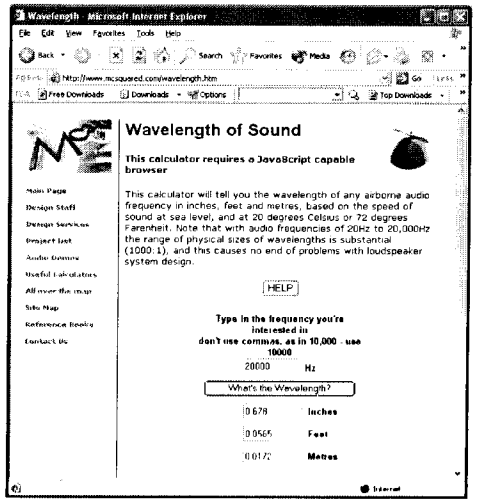
Gambar 6.48 *Gram5.0*
(http://www.musicavirtuale.net/software/listaG.htm)



Gambar 6.49 *Room Mode*
(http://www.mcsquared.com/metricmodes.htm)



Gambar 6.50 *Speech Intelligibility Calculator*
(http://www.mcsquared.com/ssdesgnm.htm#listener)



Gambar 6.51 *Wavelength of Sound*
(http://www.mcsquared.com/wavelength.htm)

Daftar Pustaka

A. Kirsta. *Book of Stress Survival*, Fireside, 1996.

ASHRAE. *ASHRAE Handbook – Fundamental*, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc., 1989.

A. Kirby. *CCCC Kick the Habit – a UN Guide to Climate Neutrality*, UNEP (United Nations Environment Programme, 2008.

B. Dawson and J. Gillow. *the Traditional Architecture of Indonesia*, London, Thames and Hudson, 1994.

B. Givoni. *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1994.

B. Givoni. *Climate Considerations in Building and Urban Design*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1998.

B. Stein. *Mechanical and Electrical Equipments for Buildings*, edisi ke 7, New York, John Wiley & Son, 1986.

C. P. Kukreja. *Tropical Architecture*, New Delhi, Tata McGrawHill Publishing Company Limited, 1978.

D. Etheridge. M. Sandberg. *Building Ventilation – Theory and Measurement*, New York, John Wiley & Sons Ltd., 1996.

L. E. Kinsler. A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley and Sond, Inc., 2000.

M. D. Perry. *Green Roofs Offer Environmentally Friendly Alternative,* Plant Engineering, Barrington, Aug 2003, Vol.57.Iss.8,pg.54.

M. Karlen dan J. Benya. *Lighting Design Basics*, John Wiley & Sons, Inc., 2004.

D. Pimentel and M. Pimentel. *Sustainability of Meat Based and Plant Based Diets and the Environment*, *Am. J. Clin. Nutr.* 78.3 (2003): 660S-663S.)

F. A. Everest. *Master Handbook of Acoustics*, ed. 4, McGraw-Hill, 2001.

G. Lippsmeier. *Building in the Tropics*, Munchen, Calwey Verlag. 1969

G. Z. Brown. J. Kline. G. Livingston. D. Northcutt and E. Wright. *Natural Ventilation in Northwest Buildings*, University of Oregon, 2004.

H. B. Awbi. *Ventilation of Buildings*, London, Chapman and Hall, 1991.

H. Kuttruff. *Acoustics , an Introduction*, Taylor and Francis, 2007.

H. Steinfeld. *et al.. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*, Livestock, Environment and Development, 2006.

J. Blauert dan n. Xiang. *Acoustics for Engineers*, Springer, 2008.

M. Baron. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London, E&FN Spon, 1993.

M. D. Egan. *Concepts in Architectural Acoustics*, New York, McGraw-Hill, 1988.

M. D. Egan. *Concepts in Architectural Lighting*, McGraw-Hill, 1983.

M. F. Drew and J. Drew. *Tropical Architecture in the Dry and Humid Zones*, Malabar: Fla., R.E. Krieger Pub. Co., 1982.

M. G. Melaragno. *Wind in Architectural and Environmental Design*, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

M. W. Liddament. *a Guide to Energy Efficient Ventilation*, Oscar Faber, 1997.

N. Baker. *Passive and Low Energy Building Design for Tropical Island Climates*, Commonwealth Science Council, 1987.

NewScientist.com. *It's Better to Green Your Diet Than Your Car*, 17 Dec. 2005.

O. H. Koenigsberger. T.G. Ingersoll, A. Mayhew, S.V. Szokolay. *Manual of Tropical Housing and Building*, Part one: Climatic Design, Bombay, Orient Longman, 1973.

P. Satwiko. *Javanese Traditional Architecture and Thermal Comfort*, 1st edition, Yogyakarta: Atma Jaya Yogyakarta University Publisher, 2004.

P. O. Fanger. *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1970.

P. Satwiko. *How Our Buildings Heat Up Our Cities: a Phenomenon as Simulated by a CFD Program*, Proceedings of the Fourth Seminar on Sustainable Environmental Architecture, October 15-16, 2003, Trisakti University, Jakarta, Indonesia, p.30-41.

P. Satwiko. *Solar-Wind Generated Roof Ventilation System (SiVATAS) for a Humid Climate*, The International Journal of Ventilation, Vol.3, No. 3, December 2004.

P. Satwiko. *The Contribution of Elevated Floor Systems to The Environmental Performance of Houses in Warm Humid Regions*, unpublished research report, School of Architecture, Victoria University of Wellington. 1992.

P. Satwiko. *The Development and Modelling of A Natural Ventilation System for Indonesian Condition - Case Study of A Roof Chimney, unpublished Master of Building Science thesis*, School of Architecture, Victoria University of Wellington. 1994.

R. Ganslandt dan H. Hofmann. *Handbook of Lighting Design*, Erco Leuchten GmbH, 1992.

R. McDowall. *Fundamental of HVAC Systems*, ASHRAE, 2006.

T. H. Beng. *Tropical Architecture and Interiors, Tradition Based Design of Indonesian - Malaysia, Singapore, Thailand*, Singapore, Page One Publishing Pte. Ltd., 1994.

T. S. Boutet. *Controlling Air Movement – A Manual for Architects and Builders*, New York, McGraw-Hill, 1987.

U. N. News Centre. *Rearing Cattle Produces More Greenhouse Gases Than Driving Cars*, UN Report Warns, 29 Nov. 2006.)

U. S. Environmental Protection Agency. *Global Warming: Methane*, 8 Mar. 2006.

U. S. Environmental Protection Agency. *Sources and Emissions: Methane*, 2 Jun. 2006.

W. Pohl dan C. Anselm. *Natural Room Illumination Using Sunlight*

Y. B. Mangunwijaya. *Pasal-Pasal Penghantar Fisika Bangunan*, Jakarta, PT Gramedia. 1980.

Indeks

A

A, B, C weighted decibels, 266
Absorpsi, 13
Absorpsi radiasi matahari permukaan dinding, 114
absorption, 268
AC Terpusat, 91
AC Unit, 91
accent lighting, 194
ACH, 5
acoustic shadow, 276
acoustics, 262
acoustics board, 269
Air Change per Hour, 5
air conditioner, 1
Air Conditioner, 88, 90
Air kondensasi, 95
akustika, 262, 275, 286
Akustika, 262
altitude, 157, 158, 168
Ambang bunyi, 263
Ambang sakit, 264
ambient sound, 267
anemometer, 18
Angin, 5
artificial light, 143
Arus cahaya, 143
atap berwarna putih, 33
atap hijau, 30
Atmosfer, 5
Auditorium, 104, 268, 282, 345, 347, 360

B

baku mutu udara ambien, 14
Ballast Factor, 226
Bangunan ibadah, 337
Bangunan-bangunan kolonial, 28
Beban Penyejukan, 95
Beda Suhu Ekivalen untuk Atap, 119
Beda Suhu Ekivalen untuk Dinding, 118
Bilangan serap, 13
boundary layer, 42
brightness, 192
Btuh, 96
Bumi, 3
bunyi, 261, 262, 263, 264, 266, 267, 268, 270, 273, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 296, 297, 300, 301, 302, 304, 305, 306
  gelombang, 261
  penerima, 261
  sumber, 261
Bunyi, 262
Bunyi ambien, 267
Bunyi dengung, 268
Bunyi struktur, 262
Bunyi udara, 262
bunyi-bunyian alami, 275
Busur Suryar, 161

C

cahaya, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 151, 152, 154, 155, 156, 159, 160, 166, 183, 185, 186
  mengukur, 147
Cahaya, 140, 141, 143, 145, 147, 148, 159, 160, 166, 170, 188, 189, 192, 194, 198, 199, 211, 213, 214, 215, 226
Cahaya buatan, 143
Cahaya langit, 143
cahaya matahari
  keterbatasan, 142
Cahaya matahari, 143
candela, 144, 190
cat, 60
ceiling cavity, 224, 239
Ceiling Cavity Ratio, 224, 242
Cerobong Atap Indonesia, 77
CFD, 33
CH_4, 14
Chiller, 93
climate change, 14
CO_2, 14
coefficient of utilization, 223
Compact Fluoresent Lamp, 107
compressor, 94
Computational Fluid Dynamics, 33
Concert Hall, 341, 349
condensation water, 95
condenser, 94
Conductivity, 12
contrast, 192
Conversion Factor, 165
Cooling load, 95
cross ventilation, 18
cross-over, 317
Cyclone, 19

D

daylight, 143
Daylight Factor, 145, 159
dB dan dBA, 272
deciBel, 270
dehumidifier, 97
DF, 145, 159, 160, 165, 166, 170, 171, 175, 180
Diagram Psikrometri, 10
dirt on glass, 165
down-lighter, 194
Dry Bulb Thermometer, 20
ducting system, 93

E

ear protector, 281
Efek Rumah Kaca, 7
efek volume, 28
Effective Ceiling Cavity Reflectance, 225, 242
Effective Floor Cavity Reflectance, 226
Effective Wall Cavity Reflectance, 226
emisivitas, 13
energi, 1, 13, 16, 17, 18, 22, 28, 31, 87, 89, 90, 96, 98, 104, 107, 108, 113, 125, 126, 140, 140, 141, 156, 189, 194, 195, 200, 205, 216, 217, 228, 229, 268, 270, 275, 283, 286, 316, 323
energi fosil, 140
ERC, 159, 160, 163, 165, 171, 173, 175, 179, 180

evaporator coil, 94
evapo-transpirasi, 17
expansion valve, 94

F

Faktor Cahaya Siang hari, 145
Faktor Perawatan, 165
FF, 165, 166, 175, 180
fibre optic, 156, 185
fixture, 194
flood light, 194
floor cavity, 224, 256
Floor Cavity Ratio, 224
footcandle, 145
footLambert, 144
freeware, 81
Frekuensi bunyi, 263

G

Garpu tala, 272
gas rumah kaca, 15
Gaya apung, 5
general lighting, 193
gereja, 183, 279, 320, 337, 339, 349, 350, 351
GF, 165, 166, 175, 180
Global warming, 14

H

Harmonik, 276
Heliostat, 184
Heliostat Project, 184
High-Intensity Discharge lamps, 195
Hukum kuadrat terbalik, 145
human speech, 275
humidifier, 97
hurricane, 19

I

iklim tropis lembab
ciri-ciri, 2
Iluminan, 144
iluminasi
kebutuhan, 154
incandescent, 194, 196, 199
Indeks artikulasi, 322
Indoor Air Quality, 13
Intensitas Bunyi, 270
Intensitas cahaya, 190
Intensitas sumber cahaya, 144
interpolasi, 242
Ionizer, 97
IRC, 159, 160, 163, 165, 171, 173, 175, 179, 180

J

Jamur, 29
jendela, 9, 10, 27, 28, 41, 43, 57, 58, 62, 63, 64, 65, 91, 93, 99, 101, 105, 106, 107, 111, 112, 113, 119, 120, 126, 127, 130, 132, 133, 136, 143, 154, 155, 160, 165, 167, 170, 173, 175, 176, 179, 180, 183, 188, 207, 228, 268, 273, 281, 284, 289, 294, 299, 302
Jendela ganda, 10, 30

K

kaos angin, 18
karbon dioksida, 13
Karpet plastik, 29
Katup ekspansi, 94

kawasan, 53
KDB, 54
kebisingan, 262, 267, 275, 276, 277, 279, 280, 281, 282, 283, 294, 296, 297, 302
Kebisingan, 263
Kecepatan bunyi, 263
kecerahan, 192
Kehilangan transmisi, 306
Kehilangan Transmisi, 267
Kekedapan bunyi, 269
Kekerasan, 267
Kelambanan Waktu, 9
kelembaban absolut, 10
Kelembaban Nisbi, 5
kenyamanan termal, 5, 6, 25, 65, 68
kerja visual, 154
KLB, 54
koefisien serap, 277, 284, 288, 326
Koil Evaporator, 94
Komponen Langit, 160
Kompresor, 94
Kondensor, 94
konduktan permukaan, 12, 34, 41
Konduktan permukaan, 12
Konduktivitas, 12
konstanta proporsional, 43
Kontras, 192
krepyak, 26
Kriteria kebisingan, 266
Kriteria pengurangan kebisingan, 266
Kualitas udara ruangan, 13
Kulit, 22

L

Lamp Burnout, 228
Lamp Lumen Depreciation, 228
Lampu fluorescent, 195, 196, 205, 214, 216
Lampu HID, 195, 203, 204
Lampu LED, 28, 197, 198, 204
Lampu pijar, 28, 147, 194, 196, 199, 200, 208, 214, 228
Langit Rancangan, 145
langit-langit, 27, 35, 37, 38, 39, 91, 92, 93, 100, 106, 107, 115, 116, 117, 136, 155, 163, 164, 173, 179, 192, 200, 204, 207, 208, 211, 213, 217, 218, 219, 224, 225, 226, 234, 237, 239, 240, 279, 282, 293, 305, 309, 332, 333, 334, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347
Lapisan Batas, 5
latent heat, 95
light, 143
Light Emmiting Diode, 197
light tube, 155
lilin, 144
Lingkaran Surya, 157
loudspeaker, 261
Loudspeaker, 321, 333, 344, 345, 346
low-range speaker, 317
lumen, 143, 144, 145, 190, 195, 200, 201, 202, 204, 219, 220, 221, 222, 223, 226, 228, 229, 230, 240, 241
Lumen Method, 222
luminaire, 194

Luminaire Ambient Temperature, 226
Luminaire Dirt Depreciation, 227
Luminaire Surface Depreciation, 226
Luminan, 144
Luminer, 194
luminous flux, flow, 143
Luminuos Intensity, 190
lux, 145
lux meter, 147

M

Maintenance Factor, 165
matahari
sinar langsung, 157
Matahari, 140
menggigil, 23
met, 5, 22, 65, 85
metana, 14
metode Givoni, 79
Metode Lumen, 222
MRT, 5, 67

N

N_2O, 14
nada rendah, 317
nada tengah, 317, 319, 347
nada tinggi, 273, 317, 319, 333
NASA, 19
Nilai Transmitan beberapa Tipe Konstruksi, 114
nitro oksida, 14
nitrogen, 13
noise control, 262
Noise Reduction Criteria, 269

O

oksigen, 13
OTTV, 113, 119, 130, 133, 134, 137
outdoor unit, 94
Overall Thermal Transfer Value, 113

P

Pakaian, 23
Panas laten, 95
Panas sensibel, 95
Papan akustik, 269
Pedoman Kualitas Udara, 100
pemanasan global, 14
Pembangkit ion negatif, 97
Pencahayaan, 188
Pencahayaan aksen, 194
Pencahayaan kerja, 193
Pencahayaan umum, 193
penerangan, 188
Pengering, 97
penggerak angin, 5
Pengkondisian Udara, 90
Pengurangan kebisingan, 266
Penjernih Udara, 96
Penyejukan evaporatif, 5
Penyejukan fisiologis, 6
Penyejukan konvektif, 6
Penyejukan radiatif, 6
Penyerap bunyi, 277
Penyerapan bunyi, 268
perasaan nyaman, 21
Perbandingan Efikasi, 205
perbedaan suhu, 5
perbedaan suhu lingkungan, 53
perbedaan tekanan, 5

Percakapan manusia, 275
Pergantian udara per jam, 5
Permanent Supplementary Artificial Lighting, Interiors, 228
Perpidahan panas konduktif, 6
Perpindahan panas, 6
Perpindahan panas konvektif, 7
Perpindahan panas radiatif, 7
Perubahan iklim, 14
photometric, 232
PMV, 46, 47, 65, 67
Point to Point Method, 220
polutan, 1, 14, 30, 90, 96, 100, 102
PPD, 46, 47, 53, 67
Predicted Mean Vote, 46
Predicted Percentaged of Dissatisfied, 46
produktivitas kerja, 88
Program ASHRAE Thermal Comfort, 67

Q

Quadratic Residue Diffuser, 330

R

Radiance, 186
ras, 22
Refrigeran, 93
Refrigerant, 93
resistan, 12, 34
Resistivitas, 12
Resistivity, 12
resonansi, 276, 278, 345, 347
Resonansi, 283
respon
estetis dan emosional, 152
reverberation sound, 268
Reverberation time, 268
RH, 5, 9, 10, 20, 48, 65, 70
Roof Thermal Transfer Value, 118
Roof ventilator, 29
room acoustics, 262
room cavity, 224
Room Cavity Ratio, 224
Room Surface Dirt Depreciation, 227
RTTV, 118

S

SC, 159, 160, 163, 165, 171, 173, 175, 176, 179, 180
sel-sel batang, 148
sel-sel kerucut, 148
sensible heat, 95
Serapan, 268
Shading Coefficient, 119
sick building syndrome, 14
Sifat Bahan, 12
Simulasi pembayangan, 183
sinar, 141, 142, 143, 147, 151, 152, 154, 156, 157, 159
sinar matahari
kelebihan, 141
sirip-sirip, 94
Sistem Saluran Udara, 93
Sivatas, 76
Skala gaya-angin beaufort, 19
Skala Sensasi Termal, 8
sky light, 143
Software, 81, 138, 186, 259, 313, 352, 353
Solar Constant, 4

Solar gain factor, 41
sound frequency, 263
sound intensity, 270
sound level, 267, 270
Sound-absorbing, 268
Sound-proofing, 269
Spektrum Bunyi, 272
split, 94
spot light, 194
storm, 19
Suara, 262
sub-woofer, 317, 318
sudut azimuth matahari, 158
Sudut azimuth matahari, 157
Sudut ketinggian matahari, 157
suhu bola basah, 10
suhu bola kering, 10
sunlight, 143
Surround effect, 318

T

Tabel Mahoney, 47, 69
Tanaman rambat, 26
task lighting, 194
tekanan uap, 10
Termometer Bola Basah, 20
Termometer Bola Kering, 20
Termostat, 95
tetumbuhan, 18
thermo-hygrometer, 20
Thermostat, 95
threshold of audibility, 263
threshold of pain, 264
Timbre, 272
Tingkat bunyi, 270
Tingkat kebisingan yang diperbolehkan, 267
Tipe paket terpisah, 91
Tipe paket tunggal, 91
tirai, 27
Tornado, 19
transmitan, 34, 40, 55
Transmition loss, 287
Transmition Loss, 267
Tritisan, 27
tropical cyclone, 19
tropik Cancer, 3
tropik Capricorn, 3
Typhoon, 19

U

Unit Koil Fan, 93
Unit Pendingin, 93
Unit Pengolah Udara, 93
up-lighter, 194
urban heat islands, 16

V

Ventilasi, 1, 4, 76
ventilasi alami, 1, 2, 25, 75
nilai negatif, 2
syarat awal, 1
Ventilasi alami, 1, 4
ventilasi atas, 28
ventilasi bawah, 28
Ventilasi Buatan, 90
ventilasi silang, 18
Voltage Variation, 226
volume effect, 10

W

Waktu Dengung, 268
wall-wash light, 194
warna, 142, 143, 148, 149, 150, 151, 153

suasana hati, 152
Warna bunyi, 272
Wet Bulb Thermometer, 20

Z

Zona nyaman, 8
Zonal Cavity Method, 222

Tentang Penulis

Prasasto Satwiko menyelesaikan pendidikan Teknik Arsitektur dari Universitas Gadjah Mada (1984), Master of Building Science (First Class Honor, 1994) dan Doctor of Philosophy (1999) dari School of Architecture, Victoria Unversity of Wellington, New Zealand dengan dana dari World Bank (lewat OTO-BAPPENAS), *postgraduate scholarship* (New Zealand), dan Universitas Atma Jaya Yogyakarta. Sejak 1984 bekerja di Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta dan menekuni bidang arsitektur digital (simulasi perilaku fisikawi dan energi bangunan) dan memperoleh Fulbright *senior research grant* untuk meneliti bidang tersebut di Carnegie Mellon University pada tahun 2005-2006. Sejak 2006 aktif dalam pelayanan informasi gaya hidup vegetarian sebagai bentuk tanggung jawab untuk memperlambat kerusakan lingkungan serta ikut mendorong kehadiran kehidupan di bumi yang sejahtera, bebas dari kekejaman dalam bentuk apa pun. Di tahun itu pula, Prasasto Satwiko menjadi Guru Besar di Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Menikah dengan Nurani Tedjowati (Sarjana Teknik Kimia) yang saat ini bekerja di Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Daerah, Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, dan dikaruniai tiga anak: Kidung Ageng, Renung Kinanthi, dan Kori Pepadhang.

M I L I K
Badan Perpustakaan
dan Kearsipan
Propinsi Jawa Timur